



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E ARQUITECTURA
SECÇÃO DE HIDRÁULICA E DOS RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAIS
LICENCIATURA EM ENGENHARIA CIVIL

HIDRÁULICA GERAL

Manual dos Trabalhos de Laboratório

(Versão de Abril de 2007)

Editores:

António Heleno Cardoso

Dídia Covas

ÍNDICE

1.	PREFÁCIO	1
2.	EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL E RESPECTIVA OPERAÇÃO	3
2.1.	Introdução	3
2.2.	Balança de Hidrostática	3
2.3.	Bancada Cussons.....	4
2.3.1.	Introdução	4
2.3.2.	Descrição da bancada, acessórios e dispositivos experimentais.....	4
2.3.3.	Acessórios da bancada	7
2.3.4.	Dispositivos experimentais	9
2.3.5.	Procedimentos experimentais de manipulação da bancada	10
2.4.	Unidade de Visualização de Escoamentos	13
2.4.1.	Descrição da unidade.....	13
2.4.2.	Procedimento experimental de manipulação da unidade	15
2.5.	Canal de Inclinação Variável.....	16
2.5.1.	Descrição do canal.....	16
2.5.2.	Procedimento experimental.....	17
2.6.	Unidade de Escoamentos em Meios Porosos.....	18
3.	ENUNCIADOS DOS TRABALHOS.....	20
3.1.	Impulsão em superfícies curvas	20
3.1.1.	Objectivo	20
3.1.2.	Equipamento utilizado	20
3.1.3.	Requisitos teóricos	20
3.1.4.	Procedimento experimental.....	21
3.1.5.	Apresentação e discussão de resultados	21
3.2.	Estudo do impacto de jactos.....	22
3.2.1.	Objectivo	22
3.2.2.	Equipamento utilizado	22
3.2.3.	Requisitos Teóricos.....	22
3.2.4.	Procedimento experimental.....	24
3.2.5.	Cálculo da força exercida sobre o alvo.....	25
3.2.6.	Apresentação e discussão de resultados	26
3.3.	Força de sustentação num perfil alar.....	27
3.3.1.	Objectivo	27

3.3.2.	Equipamento utilizado	27
3.3.3.	Requisitos teóricos	27
3.3.4.	Procedimento experimental.....	28
3.3.5.	Apresentação e discussão de resultados	29
3.4.	Perdas de carga em alargamentos e em estreitamentos.....	32
3.4.1.	Objectivo	32
3.4.2.	Equipamento utilizado	32
3.4.3.	Requisitos teóricos	33
3.4.4.	Procedimento experimental.....	33
3.4.5.	Apresentação e discussão de resultados	35
3.5.	Perdas de carga em curvas e em cotovelos	37
3.5.1.	Objectivo	37
3.5.2.	Equipamento utilizado	37
3.5.3.	Requisitos teóricos	37
3.5.4.	Procedimento experimental.....	38
3.5.5.	Apresentação e discussão de resultados	39
3.6.	Perdas de carga em válvulas.....	41
3.6.1.	Objectivo	41
3.6.2.	Equipamento utilizado	41
3.6.3.	Requisitos teóricos	41
3.6.4.	Procedimento experimental.....	42
3.6.5.	Apresentação e discussão de resultados	43
3.7.	Curvas de regolfo provocadas por comporta plana com abertura inferior.....	45
3.7.1.	Objectivo	45
3.7.2.	Equipamento utilizado	45
3.7.3.	Requisitos teóricos	45
3.7.4.	Procedimento experimental.....	45
3.7.5.	Apresentação e discussão de resultados	46
3.8.	Curvas de regolfo provocadas por uma soleira sobrelevada	47
3.8.1.	Objectivo	47
3.8.2.	Equipamento utilizado	47
3.8.3.	Requisitos teóricos	48
3.8.4.	Procedimento experimental.....	48
3.8.5.	Apresentação e discussão de resultados	49
3.9.	Curvas de regolfo provocadas por um estreitamento.....	50
3.9.1.	Objectivo	50
3.9.2.	Equipamento utilizado	50

3.9.3.	Requisitos teóricos	50
3.9.4.	Procedimento experimental.....	50
3.9.5.	Apresentação e discussão de resultados	52
3.10.	Curvas de vazão de descarregadores de parede delgada.....	52
3.10.1.	Objectivo.....	52
3.10.2.	Equipamento utilizado	52
3.10.3.	Requisitos teóricos.....	52
3.10.4.	Procedimento experimental.....	53
3.10.5.	Apresentação e discussão de resultados.....	54
3.11.	Poço atravessando um manto freático sobre camada impermeável horizontal....	55
3.11.1.	Objectivo.....	55
3.11.2.	Equipamento utilizado	55
3.11.3.	Requisitos teóricos.....	55
3.11.4.	Procedimento experimental.....	55
3.11.5.	Apresentação e discussão de resultados.....	56
4.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Balança de Hidrostática	4
Fig. 2.2 – Bancada hidráulica Cussons e acessórios.....	6
Fig. 2.3 – Painel manométrico P6106.	8
Fig. 2.4 – Descarregadores de parede delgada, P6225.....	9
Fig. 2.5 – Dispositivo para o estudo do impacto de jactos (<i>TecQuipment</i>).....	10
Fig. 2.6 – Esquema do sistema de equilíbrio de forças (<i>TecQuipment</i>)	10
Fig. 2.7 – Unidade de visualização de escoamentos: vista frontal (<i>em cima</i>) e planta (<i>em baixo</i>).....	13
Fig. 2.8 – Visualização das linhas de corrente em torno de obstáculos	14
Fig. 2.9 – Canal de inclinação variável.....	16
Fig. 2.10 – Esquema do canal de inclinação variável.....	17
Fig. 2.11 – Unidade de escoamentos em meios porosos	18
Fig. 2.12 – Posicionamento dos piezómetros.	19
Fig. 3.1 – Características geométricas dos alvos: alvo semi-esférico e alvo plano.	22
Fig. 3.2 – Impacto do jacto	23
Fig. 3.3 – Esquema de forças na posição de equilíbrio inicial	25
Fig. 3.4 – Esquema de forças para qualquer posição de equilíbrio.....	25
Fig. 3.5 – Geometria do perfil alar	28
Fig. 3.6 – Padrão das linhas de corrente em torno do perfil alar.....	28
Fig. 3.7 – Visualização das perdas de carga (contínuas e localizadas)	32
Fig. 3.8 – Dispositivos experimentais: (a) tubagem rectilínea com 10 mm de diâmetro P6221, (b) alargamento/estreitamento tronco-cónico ($\theta = 30^\circ$) P6222 e (c) alargamento/estreitamento brusco P6222.....	33
Fig. 3.9 – Tubagens P6221: (a) Trecho com quatro curvas e o diâmetro interno de 10 mm e (b) Trecho com quatro cotovelos com o diâmetro interno de 10 mm.	37
Fig. 3.10 – Tubagens P6221: (a) trecho recto com uma válvula esférica e (b) trecho recto com uma válvula de sede cilíndrica inclinada	41
Fig. 3.11 – Andamento qualitativo da superfície livre do escoamento.....	46
Fig. 3.12 – Andamento qualitativo da superfície livre do escoamento.....	48
Fig. 3.13 – Andamento qualitativo da superfície livre do escoamento.....	51

1. PREFÁCIO

Existe, há muito, um amplo consenso quanto ao interesse e necessidade da componente experimental no ensino da Hidráulica Geral no âmbito de licenciaturas em Engenharia.

Este entendimento levou a que, há cerca de trinta anos, as principais Universidades do nosso país comesçassem a adquirir e a instalar equipamentos didácticos disponíveis no mercado e, nalguns casos, a construir equipamentos inexistentes. Este esforço, então liderado no Instituto Superior Técnico (IST) pelo Prof. António Carvalho Quintela, foi acompanhado pela concepção de trabalhos experimentais que muito podem contribuir para uma melhor compreensão de conceitos fundamentais da Hidráulica pelos alunos que os realizem.

Esta preocupação com o ensino experimental recebeu um significativo impulso na década de noventa, particularmente na sequência do Programa Ciência. No que se refere ao Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos do IST, foi decisiva a intervenção do Prof. António Trigo Teixeira; com visão de futuro, conduziu o processo de aquisição dos equipamentos de forma a que, sendo dirigidos essencialmente para a investigação, viessem a permitir, em muitos casos, a realização de trabalhos de índole didáctica.

Os textos deste Manual foram elaborados com base, mas não exclusivamente, em manuais fornecidos por construtores de equipamento. Em face do exposto, não há uma verdadeira autoria dos enunciados dos trabalhos, razão pela qual este Manual não é um texto de autores mas antes de editores. Recupera-se a seguir uma frase que ilustra o envolvimento de vários docentes da Secção de Hidráulica e Recursos Hídricos e Ambientais, na fase de elaboração da primeira versão do Manual, fortemente impulsionada pelo Prof. A. Betâmio de Almeida:

O texto foi elaborado pelo corpo docente de Hidráulica I (1995-96) com base no Manual de Instruções (Parte I), 5ª edição, 1993 da CUSSONS Technology.

Prof. A. Betâmio de Almeida

Prof. A. Heleno Cardoso

Prof. A. Trigo Teixeira

Prof. A. Pires Silva

Eng^a Helena Ramos

Eng^o A. Bento Franco

Mais tarde, o Prof. Jorge Matos e o Eng.^o Rui Ferreira também intervieram na elaboração ou na revisão dos enunciados.

Os trabalhos laboratoriais que integram o Manual foram concebidos para as disciplinas de Hidráulica I e de Hidráulica II da Licenciatura em Engenharia Civil do IST, mas podem servir, igualmente, as licenciaturas de Engenharia do Ambiente e Engenharia do Território.

Actualmente, o IST dispõe de equipamentos que permitem realizar, no âmbito da Hidráulica I, trabalhos de Hidrostática (impulsão em superfícies curvas), Hidrocinemática (visualização dos escoamentos e determinação da força de sustentação em perfis alares), Hidrodinâmica Teórica (impacto de jactos) e Escoamentos Permanentes sob Pressão (perdas de carga contínuas e em singularidades). Para a Hidráulica II, existem equipamentos que viabilizam o estudo de Escoamentos com Superfície Livre (curvas de regolfo junto de comportas, de sobrelevações do fundo e de contracções da largura da secção transversal do escoamento), de Escoamentos em Descarregadores (descarregadores triangulares e rectangulares com dupla contracção, de parede delgada) e de Escoamentos em Meios Porosos (escoamentos entre galerias e trincheiras).

Este Manual reflecte a situação actual, ou seja, inclui, no Capítulo 2, a descrição do equipamento existente no IST e dos correspondentes modos de operação; inclui ainda, no Capítulo 3, os enunciados dos trabalhos disponíveis e os aspectos teóricos que permitem tirar partido da respectiva realização. Não é, porém, um trabalho acabado.

Pretende-se continuar a evoluir e, nessa perspectiva, assume grande prioridade a aquisição de um banco de ensaio de bombas para dar apoio ao estudo das Turbomáquinas, no âmbito da Hidráulica II. Outros trabalhos podem ser concebidos com o equipamento existente ou com equipamento, não necessariamente dispendioso, a adquirir futuramente.

O carácter inacabado do Manual determina a forma como foi editado: em *ficheiro* com formato digital (*Portable Disk Format*) e em *dossier* com folhas soltas, susceptível de ser facilmente substituído ou acrescentado.

Que seja um bom elemento de trabalho para os alunos do IST é a satisfação que do Manual pretendem tirar os seus editores.

2. EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL E RESPECTIVA OPERAÇÃO

2.1. Introdução

O equipamento actualmente existente no Laboratório de Hidráulica do DECivil do Instituto Superior Técnico compreende a Balança de Hidrostática, Bancadas Cussons (com dispositivos para o estudo de: i) perdas de carga contínuas e em singularidades, ii) impacto de jactos – em dispositivo da *TecQuipment* – e iii) escoamento sobre descarregadores de parede delgada), a Unidade de Visualização de Escoamentos, o Canal de Inclinação Variável e a Unidade de Escoamentos em Meios Porosos.

Este capítulo é consagrado à descrição dos referidos equipamentos, pela ordem acima indicada, e ao estabelecimento dos procedimentos experimentais genéricos a adoptar na realização dos mesmos.

2.2. Balança de Hidrostática

A balança de hidrostática destina-se ao estudo experimental da impulsão em superfícies planas e curvas. Encontra-se representada na Fig. 2.1 e inclui um reservatório (R) de paredes transparentes – em que é possível controlar o nível de água através de um dreno (D) – e uma balança (B) de pesos calibrados (P). Através da operação desta balança, cujo braço mede 275 mm, é possível obter o momento associado às pressões hidrostáticas que se exercem sobre um quadrante imerso (A) com as seguintes dimensões:

- | | |
|--------------------------------------|--------|
| – raio da superfície curva exterior: | 200 mm |
| – raio da superfície curva interior: | 100 mm |
| – espessura: | 75 mm |

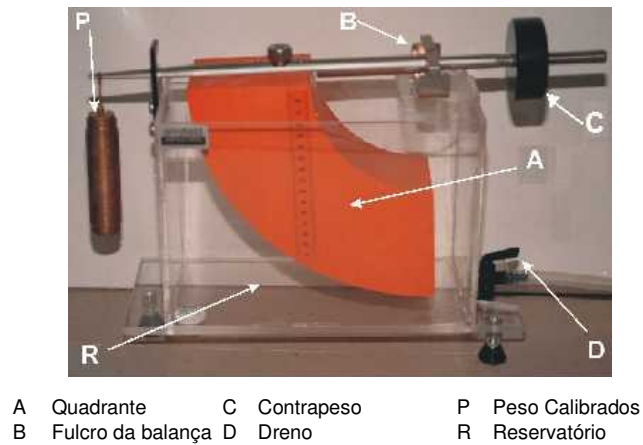


Fig. 2.1 – Balança de Hidrostática

Os procedimentos específicos do trabalho a realizar na balança serão neste caso, como para os restantes equipamentos, estabelecidos no Capítulo 3.

2.3. Bancada Cussons

2.3.1. Introdução

Descrevem-se, a seguir, a Bancada Cussons, P6100, os respectivos acessórios e dispositivos experimentais e os procedimentos experimentais genéricos de manipulação da bancada.

Os acessórios da bancada são o variador de velocidades da bomba, P6101, o reservatório de entrada de carga constante, P6103, o reservatório de saída de carga variável, P6104, e o painel manométrico, P6106.

Os *dispositivos experimentais* existentes viabilizam a realização do seguinte conjunto de trabalhos:

- determinação de perdas de carga em tubagens rectilíneas e em singularidades;
- estudo do impacto de jactos;
- caracterização de curvas de vazão de descarregadores de parede delgada.

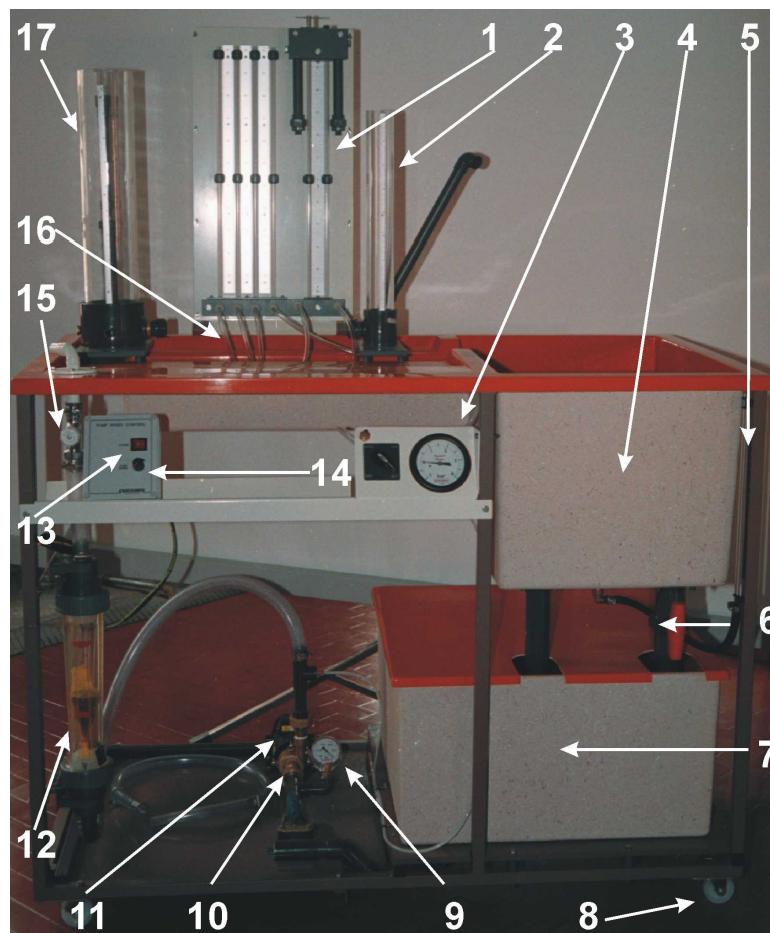
2.3.2. Descrição da bancada, acessórios e dispositivos experimentais

A bancada hidráulica Cussons e seus acessórios e, bem assim, o equipamento experimental associado foram desenvolvidos de modo a proporcionar uma gama completa de experiências no domínio da Mecânica dos Fluidos. A Fig. 2.2 ilustra a bancada hidráulica

Cussons equipada com vários acessórios e os dispositivos necessários à realização de uma experiência.

A bancada é constituída por uma estrutura metálica em que se apoiam um tanque de alimentação [7], *cf.* Fig. 2.2, uma bomba centrífuga [11], o correspondente circuito hidráulico e um tampo superior em fibra de vidro. Este tampo, sobre o qual se podem instalar os dispositivos necessários para a realização de ensaios, tem moldado, por sua vez, um pequeno canal de secção transversal rectangular que dá acesso a um tanque de medição de caudais [4] pelo método volumétrico.

O volume de água contido no tanque de medição [4], num dado instante, pode ser avaliado com o auxílio de uma pequena tubagem transparente graduada em litros [5], exterior ao tanque e em comunicação com ele. Tendo em vista garantir precisão adequada para toda a gama de caudais utilizáveis, o tanque tem uma secção mais estreita a nível inferior onde pode armazenar 10 ℓ de água, e uma secção mais larga, a nível superior, onde armazena mais 35 ℓ. Existe também um rotâmetro [12] e um descarregador triangular em acrílico transparente (que se pode montar na extremidade de jusante do canal do tampo da bancada) que permitem a leitura contínua do caudal escoado.



- | | |
|--|---|
| 1. Painel manométrico | 10. Válvula de saída do reservatório de alimentação |
| 2. Reservatório de saída de carga variável | 11. Bomba centrífuga |
| 3. Manómetro com válvula de quatro vias | 12. Rotâmetro |
| 4. Tanque para medição de caudais | 13. Interruptor geral |
| 5. Tubagem graduada para medir caudais | 14. Variador de velocidades da bomba |
| 6. Válvula esférica | 15. Válvula reguladora de caudais |
| 7. Tanque de alimentação | 16. Tubo flexível |
| 8. Rodas da bancada | 17. Reservatório de entrada de carga constante |
| 9. Manómetro | |

Fig. 2.2 – Bancada hidráulica Cussons e acessórios.

O tanque de medição, equipado com uma descarga de segurança para evitar extravasamentos, descarrega pelo fundo para o tanque de alimentação, com uma capacidade de 120 ℓ, através de uma tubagem controlada por uma válvula esférica de abertura rápida [6]. A recirculação é assegurada pela bomba centrífuga [11] que envia água directamente do tanque de alimentação para um dado dispositivo experimental ou para um dispositivo de tranquilização, essencialmente constituído por esferas de vidro, que se pode colocar na extremidade de montante do canal do tampo. O caudal é controlável por uma válvula de regulação de caudais [15] ou actuando o variador de velocidades da bomba [14]. A pressão a jusante da bomba pode medir-se no manómetro instalado no painel frontal da

bancada [3] manipulando uma válvula de quatro vias. A pressão na tubagem de aspiração é lida noutro manómetro instalado directamente na tubagem [9].

A bomba centrífuga acima referida está montada na plataforma inferior da bancada, o que permite aceder-lhe facilmente. A água escoar-se no sentido da bomba a partir do tanque de alimentação [7] através de uma tubagem. O escoamento pode ser interrompido por uma válvula situada à saída do reservatório [10]. A água é enviada pela bomba através de outra tubagem cujo trecho ascendente dá acesso ao rotâmetro [12] que permite medir o caudal. A jusante do rotâmetro existe a válvula de regulação de caudal [15] situada no canto superior esquerdo da instalação.

A bomba centrífuga é rápida. À velocidade de 5 000 rpm, promove a bombagem de 50 ℓ/min para a altura total de elevação de aproximadamente 3 m; a altura de elevação em vazio é cerca de 16 m.

A bancada dispõe de um manómetro montado no painel frontal [3] que pode ser ligado por intermédio de uma válvula de quatro vias, alternadamente, a quatro tomadas de pressão. Estas tomadas situam-se respectivamente

- na secção de saída da bomba;
- na secção de saída de uma bomba suplementar (que actualmente não existe);
- imediatamente a jusante da válvula de regulação de caudal;
- em tomadas auxiliares (actualmente fora de serviço).

2.3.3. *Acessórios da bancada*

Para além do dispositivo de tranquilização do escoamento, constituído por um cubo preenchido com esferas de vidro e que se pode instalar na secção de entrada do canal situado no tampo da bancada, esta dispõe, na versão actual, dos quatro acessórios que se passam a descrever.

1. *Variador de velocidades da bomba, P6102.* Esta unidade [14] permite proceder à variação contínua da velocidade de rotação da bomba de modo a gerar diferentes curvas características da mesma. A utilização do variador de velocidades também permite uma melhor regulação do caudal, particularmente para valores reduzidos do mesmo.
2. *Reservatório de entrada de carga constante, P6103.* O reservatório de entrada [17] permite garantir carga constante para as experiências em que tal é necessário. Fixa-se à bancada por intermédio de dois pernes e serve de suporte a vários dispositivos experimentais. É possível garantir dois níveis de carga, um de 250 mm e outro de 500 mm, consoante a experiência em que o reservatório é utilizado.

3. *Reservatório de saída de carga variável, P6104.* O reservatório de saída de carga variável [2] é utilizado conjuntamente com o de carga constante para impor a diferença de carga necessária à realização de uma determinada experiência. O nível da água neste acessório pode fixar-se em qualquer posição entre 50 mm e 300 mm acima do eixo do dispositivo experimental intercalado entre ele e o reservatório de carga constante.
4. *Painel manométrico, P6106.* O painel manométrico [1] pode ser utilizado para medir perdas de pressão ou de carga. Este acessório (Fig. 2.3) consiste em quatro tubos piezométricos, susceptíveis de serem ligados simultaneamente a outras tantas tomadas de pressão, e num manómetro de mercúrio em "U" que se utiliza para medir diferenças de pressões elevadas. Todos os tubos estão montados num painel vertical que, por sua vez, se pode fixar ao tampo da bancada. As ligações dos tubos às tomadas de pressão são feitas por intermédio de tubagens transparentes flexíveis, procurando evitar trajectos em sifão para que não se formem bolhas de ar. Os ramos do manómetro de mercúrio devem ser preenchidos com água, acima do mercúrio, tendo o cuidado de purgar bolhas de ar através de uma válvula colocada no topo do painel.



Fig. 2.3 – Painel manométrico P6106.

A válvula é de três vias e permite igualar os níveis de mercúrio em ambos os ramos do manómetro, expulsar bolhas de ar que se formem na água e operar normalmente o manómetro. De referir que ao avaliar diferenças de pressão com o manómetro de

mercúrio se deve considerar uma densidade aparente de 12,6 (densidade do mercúrio menos densidade da água).

2.3.4. Dispositivos experimentais

Tendo em vista a realização de algumas experiências, a bancada está equipada com os dispositivos experimentais a seguir descritos sumariamente.

- a) *Dispositivos para a determinação de perdas de carga em tubagens rectilíneas e em singularidades, P6221 e P6222.* O conjunto de dispositivos P6221 consiste em i) duas tubagens rectilíneas com 7 mm e 10 mm de diâmetro, respectivamente, ii) uma tubagem de 10 mm com quatro curvas a 90°, iii) uma tubagem de 10 mm com quatro cotovelos a 90°, iv) um troço de tubagem com uma válvula esférica e v) um troço de tubagem com uma válvula em "Y".

O conjunto de dispositivos P6222 é constituído por duas tubagens com diâmetro de entrada igual a 10 mm e diâmetro de saída igual a 20 mm, uma delas com transição de secção em aresta viva e a outra com transição a 30°. Estas tubagens podem ser utilizadas para estudar perdas de carga tanto em contracções como, invertendo o sentido, em expansões. Os dispositivos referidos podem instalar-se entre os reservatórios de entrada, P6103, e de saída, P6104. Utiliza-se o painel manométrico P6106 para medir perdas de carga e para as relacionar com o caudal.

- b) *Descarregadores de parede delgada, P6225.* Tendo em vista a caracterização de curvas de vazão de descarregadores de parede delgada, existem três descarregadores que integram o dispositivo de ensaio P6225. Na Fig. 2.4 estão esquematicamente representados os três descarregadores, com os comprimentos expressos em milímetros.

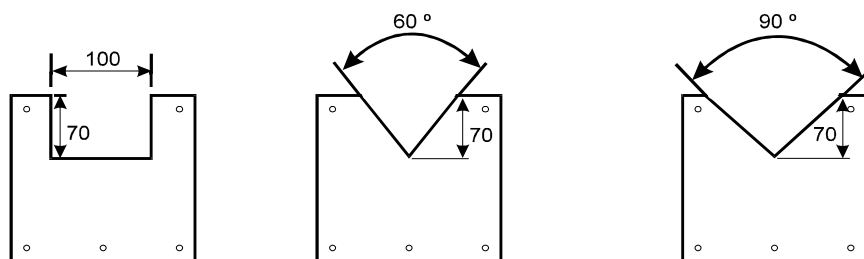
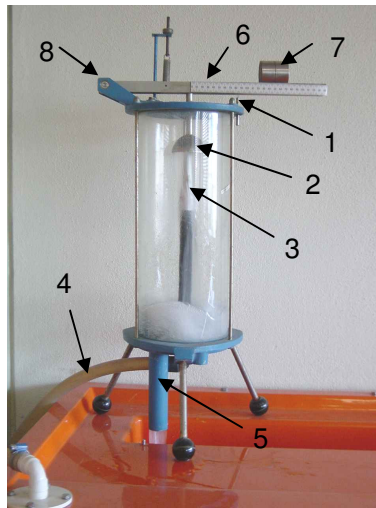


Fig. 2.4 – Descarregadores de parede delgada, P6225

- c) *Dispositivo para o estudo do impacto de jactos, TecQuipment.* Este dispositivo (cf. Fig. 2.5) pode ser utilizado para estudar a acção de um jacto de água sobre dois alvos intermutáveis, nomeadamente uma placa plana e uma superfície semi-esférica côncava. O jacto é criado por um injector com 10 mm de diâmetro.



- | | |
|----------------------------|-------------------|
| 1. Indicador de Equilíbrio | 5. Dreno |
| 2. Alvo | 6. Braço graduado |
| 3. Injector | 7. Massa |
| 4. Alimentação | 8. Charneira |

Fig. 2.5 – Dispositivo para o estudo do impacto de jactos (*TecQuipment*)

No dispositivo *TecQuipment*, a forma de equilibrar a força resultante do impacto de jactos é obtida deslocando uma massa de 0,600 kg sobre um braço graduado. O alvo é fixado a esse braço, na origem da escala, de acordo com a Fig. 2.6.

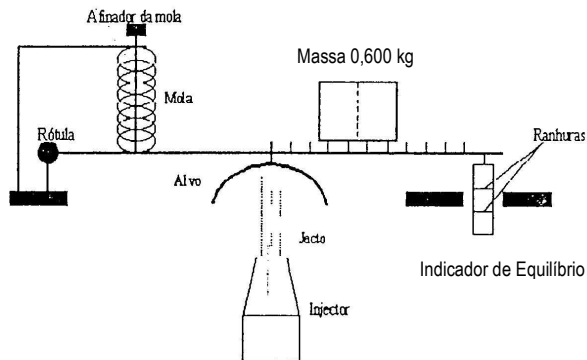


Fig. 2.6 – Esquema do sistema de equilíbrio de forças (*TecQuipment*)

2.3.5. Procedimentos experimentais de manipulação da bancada

1. Procedimento de arranque de um ensaio:

Para iniciar uma dada experiência adopta-se o seguinte procedimento:

- a) Abre-se completamente a válvula situada a jusante do tanque de aspiração [10].

- b) Verifica-se o nível de água no tanque de aspiração e enche-se, se necessário, até 20 mm do seu bordo superior.
- c) Consoante os casos, coloca-se o cubo de tranquilização na zona de montante do canal da bancada ou coloca-se, no seu tampo, o dispositivo experimental necessário à realização de uma dada experiência, fixando-o nos pernes existentes.
- d) Liga-se o tubo flexível transparente de alimentação situado a jusante da válvula de regulação de caudal [15] ao cubo de tranquilização ou ao dispositivo experimental instalado.
- e) Fecha-se a válvula de regulação de caudal [15].
- f) Liga-se a bancada a uma tomada de corrente e liga-se a bomba.
- g) Fixa-se o caudal pretendido actuando sobre a válvula [15] e/ou sobre o variador de velocidades de rotação da bomba.

2. Regulação do caudal

Embora existam duas válvulas no circuito de bombagem, só se deve utilizar a que se encontra no canto superior esquerdo da bancada para efeitos de regulação do caudal (válvula [15]). A outra válvula (a [10]) deve ser mantida totalmente aberta. Também se pode regular o caudal actuando na velocidade de rotação da bomba através do variador de velocidades [14].

3. Medição do caudal

O caudal pode ser medido por três métodos diferentes que se passam a descrever.

Método volumétrico

O recurso ao método volumétrico implica o seguinte procedimento:

- a) Fecha-se a válvula esférica [7].
- b) Começa-se a cronometragem do tempo quando o nível de água atinge o zero (ou outro nível seleccionado) na tubagem graduada exterior ao tanque [5].
- c) Recolhe-se um dado volume de água e regista-se o correspondente tempo de recolha; para pequenos caudais basta utilizar a parte inferior, estreita, do tanque; para caudais mais elevados, deve começar-se a contagem dos tempos na marca correspondente a 15ℓ.
- d) Abre-se a válvula esférica [7] depois de se proceder ao registo do volume recolhido e do tempo correspondente; de notar que, no caso de inadvertidamente não se abrir a válvula, existe um tubo de segurança que garante a passagem da água directamente para o tanque de aspiração.
- e) Calcula-se o caudal Q dividindo o volume recolhido pelo correspondente tempo de recolha, t .

Descarregador triangular

Para caudais superiores a 10 ℓ/min, pode utilizar-se, em alternativa, um descarregador triangular de soleira delgada, graduado em ℓ/min, que permite uma leitura directa.

Rotâmetro

A bancada está ainda equipada com um rotâmetro [12] que permite ler continuamente caudais na gama compreendida entre 600 ℓ/h e 6000 ℓ/h. Sempre que não haja menção em contrário, os caudais deverão ser medidos com este dispositivo.

4. Medições de pressão

Podem conhecer-se as pressões na secção de saída da bomba [11], imediatamente a jusante da válvula de regulação de caudal [15] ou numa tomada de pressão auxiliar, seleccionando a posição correspondente da válvula de quatro vias instalada no canto superior direito do painel frontal da bancada. A pressão na tubagem de aspiração da bomba pode ler-se no manómetro [9] instalado directamente sobre a tubagem. De notar que quando se mede a pressão à saída da bomba se devem adicionar 0,07 bar à leitura pelo facto de o manómetro associado à válvula de quatro vias se encontrar 0,7 m acima da tomada de pressão.

É aconselhável rodar sempre a válvula de selecção das tomadas de pressão no sentido contrário ao da rotação dos ponteiros do relógio para evitar a injeção de água previamente acumulada na tubagem da tomada auxiliar quando esta não está em uso (situação actual).

5. Procedimento de paragem

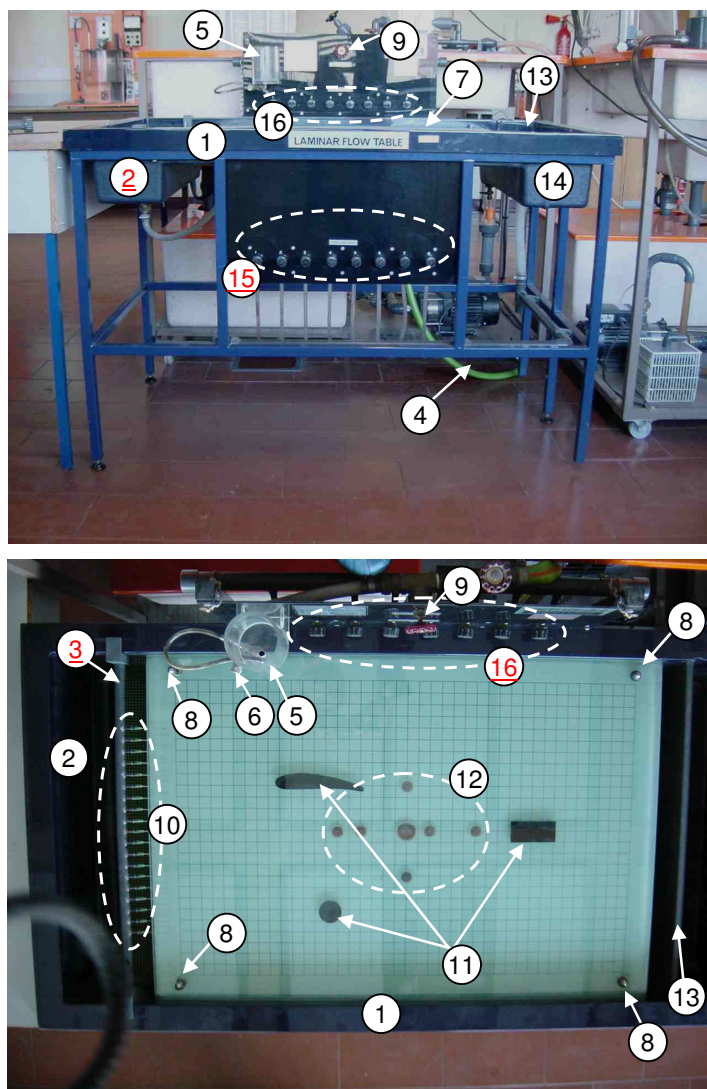
Para parar um ensaio procede-se do seguinte modo:

- (i) Fecha-se a válvula de regulação de caudais [15].
- (ii) Abre-se a válvula esférica de saída do tanque de medição [6].
- (iii) Leva-se a velocidade de rotação da bomba a zero actuando o variador de velocidades [14].
- (iv) Desliga-se a bomba.

2.4. Unidade de Visualização de Escoamentos

2.4.1. Descrição da unidade

A unidade de visualização de escoamentos (*Armfield LaminarFlow Analysis Table*) representada esquematicamente na Fig. 2.7 permite obter e observar linhas de corrente e trajectórias em torno de obstáculos colocados no seio de escoamentos planos. Permite ainda simular e visualizar escoamentos associados a poços e a nascentes.



- | | |
|--|---|
| 1. Base da unidade | 9. Válvula de controle da alimentação |
| 2. Reservatório de montante | 10. Orifícios de injeção do traçador |
| 3. Tubagem de alimentação de marcador | 11. Obstáculo |
| 4. Tubagem de descarga | 12. Orifícios de simulação de poços e nascentes |
| 5. Reservatório do traçador (tinta) | 13. Descarregador de saída |
| 6. Válvula de controle do traçador (tinta) | 14. Reservatório de saída |
| 7. Placa superior (de vidro) | 15. Válvulas de controle da alimentação dos poços |
| 8. Ventosas de fixação | 16. Válvulas de controle da alimentação das nascentes |

Fig. 2.7 – Unidade de visualização de escoamentos: vista frontal (*em cima*) e planta (*em baixo*)

Os escoamentos planos são conseguidos entre duas placas de vidro planas horizontais, praticamente lisas. Sendo a placa superior em vidro [7], é possível visualizar os escoamentos. A superfície total da mesa tem 90 cm de comprimento e 60 cm de largura. A largura útil do campo do escoamento entre placas é apenas 45 cm e a altura é 3 mm.

O fluido utilizado é água que, abastecida pela rede geral do laboratório, dá entrada na unidade através da tubagem de alimentação. O caudal é regulado através da válvula de abastecimento [9]. A água prossegue para o campo do escoamento entre placas passando por um pequeno reservatório [2] localizado a montante das placas, a toda a sua largura.

No exemplo da Fig. 2.7, o escoamento dá-se da esquerda para a direita, sendo a água recolhida noutro reservatório em que o nível da superfície livre é controlado por um descarregador [13], existente a jusante e, igualmente, a toda a largura das placas. Passando o descarregador, a água sai por gravidade para um reservatório de saída [14].

O traçador das linhas de escoamento é tinta injectada a partir do reservatório [5] através de 19 agulhas muito finas [10] existentes numa tubagem de alimentação do traçador [3]. A distância entre agulhas é 20 mm. A válvula [6] regula o caudal de tinta/traçador. A tinta é distribuída no campo do escoamento através das referidas agulhas.

Os obstáculos [11] a colocar no interior do escoamento podem tomar formas diversas mas, como o campo de escoamento, têm todos 3 mm de espessura.

A unidade dispõe de 8 orifícios que podem funcionar como poços ou nascentes. As válvulas [16] regulam o caudal de água desses orifícios quando utilizados como nascentes, enquanto as válvulas [15] regulam o caudal quando estes funcionam como poços.

Na Fig. 2.8, a unidade está em funcionamento, podendo visualizar-se o campo de escoamento com o andamento das linhas de corrente em torno de três obstáculos.

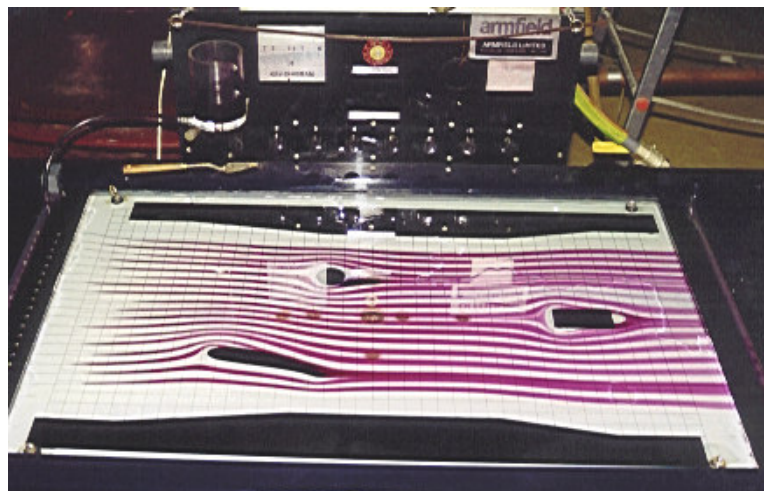


Fig. 2.8 – Visualização das linhas de corrente em torno de obstáculos

2.4.2. *Procedimento experimental de manipulação da unidade*

Depois de ligar as tubagens de alimentação e de descarga, respectivamente, às redes de abastecimento e de esgoto, é fundamental eliminar o ar tanto dos circuitos da unidade como do campo do escoamento entre placas. Para o efeito, procede-se do seguinte modo:

- a) Retira-se, com cuidado, a placa superior de vidro.
- b) Lavam-se com detergente ambas as placas de vidro (a inferior e a superior).
- c) Colocam-se os obstáculos pretendidos, premindo-os fortemente contra a placa inferior.
- d) Monta-se, de novo, a placa superior de vidro.
- e) Abrem-se todas as válvulas do circuito de água, incluindo as dos poços e nascentes, e a válvulas [6] do circuito do traçador.
- f) Alimenta-se a unidade com o máximo caudal disponível por forma a eliminar o ar dos circuitos. Fecham-se, seguidamente, todas as válvulas.
- g) Restabelece-se o escoamento abrindo a válvula [9] e eliminam-se as bolhas de ar que existam no campo do escoamento plano.
- h) Com a válvula [6] fechada e mantendo o escoamento, enche-se o reservatório com a tinta diluída.
- i) Abre-se a válvula [9] e, parcialmente, a válvula [6].
- j) Quando o traçador formar as linhas de corrente na mesa, iniciam-se as observações.

2.5. Canal de Inclinação Variável

2.5.1. Descrição do canal

O canal de inclinação variável do Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos do IST (Fig. 2.9), representado esquematicamente na Fig. 2.10, tem 5,00 m de comprimento, 0,30 m de largura e 0,40 m de altura, sendo as paredes e o fundo de acrílico ($K = 90 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$).

O canal é articulado a meio vão numa rótula de cota constante que divide o canal em dois trechos de comprimentos aproximadamente iguais. O canal é de inclinação variável. A inclinação do canal é fixada através da manipulação de roldanas de ajustamento da inclinação.



Fig. 2.9 – Canal de inclinação variável

Sobre as paredes do canal pode deslocar-se um hidrómetro de ponta direita, para medição das alturas do escoamento. Ao longo da parede esquerda existe uma régua graduada que permite referenciar a secção de medição.

A água, proveniente do tanque de nível constante do Laboratório, dá entrada no tanque de montante do canal. O caudal pode ser regulado por intermédio da válvula de cunha existente no circuito de alimentação. O escoamento, depois de passar por baixo de um dispositivo de tranquilização da superfície livre situado à entrada, processa-se com superfície livre ao longo do canal até a secção terminal de descarga para o tanque de jusante. A seguir, passa por uma fiada de tijolos furados que tranquilizam a superfície livre

do escoamento e segue ao longo de uma caleira com 0,344 m de largura, em cuja extremidade de jusante existe um descarregador Bazin com 0,250 m de altura.

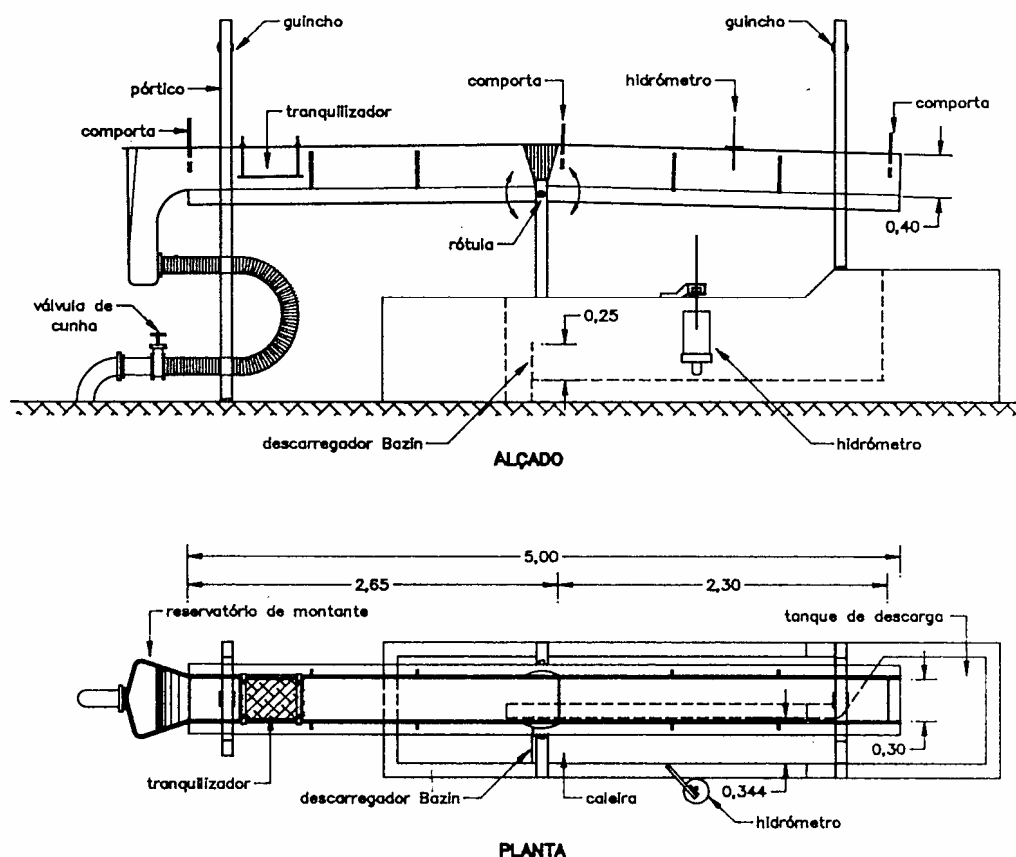


Fig. 2.10 – Esquema do canal de inclinação variável

À distância de 1,45 m a montante do descarregador Bazin, está instalado um hidrómetro de ponta direita num copo em contacto com a água da caleira, viabilizando a medição da altura do escoamento em relação à crista e, desse modo, o cálculo do caudal. A água que se escoia sobre o descarregador Bazin é encaminhada pelos circuitos de retorno e pelo sistema de bombagem do Laboratório para o tanque de nível constante acima referido, concluindo-se, assim, o percurso da água em circuito fechado.

2.5.2. Procedimento experimental

Para efeitos da realização do trabalho, fixa-se o declive do canal ao longo de toda a sua extensão, não devendo os alunos actuar as roldanas de ajustamento da inclinação sob pena de poderem causar danos na instalação.

Antes do início das medições, o responsável pela condução dos ensaios fixará a abertura da válvula de cunha e a abertura das comportas. Estas variáveis devem permanecer inalteradas ao longo das medições.

2.6. Unidade de Escoamentos em Meios Porosos

A unidade de escoamentos em meios porosos, representada esquematicamente na Fig. 2.11, consiste num tanque [1] com 1,115 m de comprimento, 0,585 m de largura e 0,530 m de altura, construído em fibra de vidro e suportado por uma estrutura metálica [2]. Quatro pés ajustáveis [3] permitem, com a ajuda de um nível de bolha [8], nivelar o equipamento.

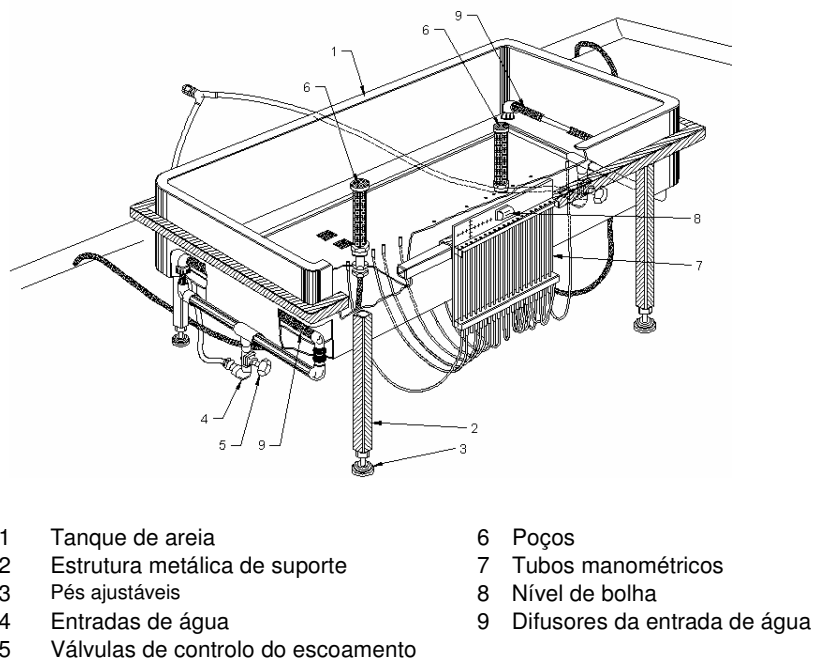


Fig. 2.11 – Unidade de escoamentos em meios porosos

Nas duas extremidades do tanque existem entradas de água [4] reguladas por válvulas [5] que têm em vista controlar o nível de água dentro do tanque. A entrada de água no tanque é feita ao longo de dois tubos perfurados ou difusores [9] com consumo uniforme de percurso.

As duas entradas podem funcionar simultânea ou isoladamente, ficando nesse caso uma a funcionar como entrada de água e a outra como saída.

Dois poços [6] instalados no fundo do tanque, permitem a realização de estudos de simulação de extracção de água.

Pode recorrer-se à utilização de um anel cilíndrico para simular uma escavação e a correspondente drenagem.

A areia utilizada nos ensaios é caracterizada pelo diâmetro mediano de 1,4 mm.

3. ENUNCIADOS DOS TRABALHOS

3.1. Impulsão em superfícies curvas

3.1.1. *Objectivo*

O objectivo deste trabalho consiste na determinação das componentes horizontal e vertical da impulsão nas paredes curvas de um corpo mergulhado em água, bem como do respectivo ponto de aplicação (centro de impulsão).

3.1.2. *Equipamento utilizado*

O equipamento utilizado no estudo da impulsão em superfícies curvas é a balança de hidrostática (Fig. 2.1) descrita no parágrafo 2.2.

3.1.3. *Requisitos teóricos*

A elaboração deste trabalho exige conhecimentos de Hidrostática. Apresenta-se, em seguida, um breve resumo de expressões fundamentais que podem ser aplicadas ao cálculo da impulsão sobre superfícies planas ou curvas.

A componente vertical da impulsão, Π_V , é igual ao peso do volume de líquido delimitado pela superfície premida, pelas projectantes verticais tiradas pelo contorno daquela superfície e pela superfície livre do líquido. Assim,

$$\Pi_V = \gamma \nabla,$$

em que γ é o peso volúmico do líquido e ∇ é o volume de líquido acima definido.

A componente horizontal da impulsão, segundo uma dada direcção, Π_h , é igual à impulsão hidrostática exercida sobre a projecção ortogonal da superfície premida num plano normal à referida direcção. Assim:

$$\Pi_h = \gamma A_h h_0$$

em que A_h é a área da superfície projectada e h_0 é a profundidade do correspondente centro de gravidade.

3.1.4. *Procedimento experimental*

Antes de iniciar os ensaios, calibra-se a balança deslocando o contrapeso [C] (*cf.* Fig. 2.1), até a balança ficar em equilíbrio na posição horizontal. Seguidamente:

1. Coloca-se água no reservatório [R], garantindo que ambas as superfícies curvas do quadrante ficam parcialmente submersas.
2. Equilibra-se o momento resultante da impulsão hidrostática com o dos pesos da balança.
3. Registam-se os valores do nível da água no reservatório (medido na escala graduada do quadrante) e dos pesos utilizados para equilibrar a balança.
4. Repete-se o procedimento para um novo nível da água, de modo a que apenas a superfície curva inferior fique parcialmente submersa.
5. Apresentação e discussão de resultados

3.1.5. *Apresentação e discussão de resultados*

Tendo em vista facilitar a apresentação e discussão dos resultados, sugere-se o seguinte procedimento:

1. Calculam-se, para o primeiro nível de água (duas superfícies submersas),
 - as componentes horizontais da impulsão nas superfícies curvas;
 - as componentes verticais da impulsão nas superfícies curvas;
 - as coordenadas dos centros de impulsão das superfícies curvas no referencial ortonormado com origem no fulcro;
 - a impulsão vertical sobre a parte submersa do quadrante e a distância da respectiva linha de acção ao fulcro.
2. Por equilíbrio de momentos, validam-se os resultados anteriores e discutem-se eventuais desvios.
3. Repete-se o procedimento anterior para o segundo nível de água, tendo presente que passa a existir somente uma superfície curva submersa.

3.2. Estudo do impacto de jactos

3.2.1. Objectivo

O objectivo deste trabalho consiste na determinação da força de impacto de jactos em alvos de formas diferentes.

3.2.2. Equipamento utilizado

O equipamento experimental utilizado no estudo do impacto de jactos é o dispositivo *TecQuipment*, apresentado no parágrafo 2.3.4.

Podem ser utilizados dois alvos intermutáveis: um deles tem a face inferior semi-esférica côncava e o outro tem a face plana, *cf.* Fig. 3.1.



Fig. 3.1 – Características geométricas dos alvos: alvo semi-esférico e alvo plano.

Durante o ensaio a água sai em jacto através do injector acertando no alvo (*cf.* Fig. 2.5). O injector tem 10 mm de diâmetro interior.

3.2.3. Requisitos Teóricos

Quando um jacto de água, com uma dada velocidade, incide numa superfície sólida, a água é deflectida pela superfície. Desprezando diferenças de cota ao longo da superfície e perdas de energia mecânica por atrito e por choque, a velocidade do escoamento resulta constante.

Considere-se um jacto de água cujo impacto na superfície do alvo causa a mudança de direcção de um ângulo θ , conforme se ilustra na Fig. 3.2. Nas referidas condições, o módulo da velocidade ao longo da superfície é igual à velocidade incidente V_i . A força exercida no alvo é igual e oposta à força que actua na água e que provoca a mudança de direcção.

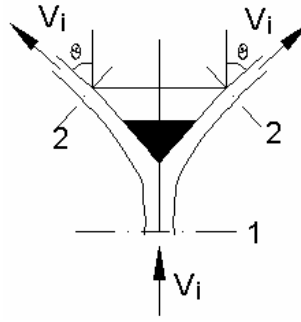


Fig. 3.2 – Impacto do jacto

O princípio da conservação da quantidade de movimento aplicado a um volume de controle definido entre a secção de entrada (secção 1) e a secção de saída (secção 2), toma a forma

$$\vec{G} + \vec{\pi} + \vec{I} + \vec{M}_1 - \vec{M}_2 = 0$$

em que $\vec{G}$ representa o peso do líquido contido no volume de controle, $\vec{\pi}$ é a resultante das forças de contacto, $\vec{I}$ a resultante das forças locais de inércia e $(\vec{M}_1 - \vec{M}_2)$ a resultante das quantidades de movimento entradas para o volume de controle e dele saídas por unidade de tempo. Tratando-se de escoamento permanente, tem-se $\vec{I} = 0$; desprezando o efeito do peso do fluido, obtém-se, na direcção do jacto incidente (Fig. 3.2),

$$\pi + \rho Q(V_i - V_i \cos \theta) = 0$$

em que π é a resultante da força que a água exerce sobre o alvo, segundo a referida direcção. Pretendendo-se determinar a força, F , que o alvo exerce sobre o fluido, tem-se $F = -\pi$. Por isso,

$$F = \rho Q(V_i - V_i \cos \theta) = \rho Q V_i (1 - \cos \theta)$$

Nos casos em estudo, considera-se que as condições da experiência são tais que o ângulo de saída do escoamento é paralelo ao ângulo de saída do alvo θ .

Para o alvo *plano*, o ângulo θ de saída é igual a 90° e $\cos \theta = 0$, vindo

$$F = \rho Q V_i \quad \therefore \quad \frac{F}{\rho Q V_i} = 1,0$$

Para o alvo *semi-esférico*, o ângulo θ de saída é igual a 180° e $\cos \theta = -1$, vindo

$$F = 2\rho Q V_i \quad \therefore \quad \frac{F}{\rho Q V_i} = 2,0$$

A velocidade V_n do jacto à saída do injector pode ser calculada medindo o caudal Q e a área de saída do injector A :

$$V_n = \frac{Q}{A}$$

Contudo, como o injetor está abaixo do alvo, a velocidade do jacto no ponto de impacto, V_i , será menor que a velocidade à saída do injetor, V_n , atendendo à conversão da energia cinética em energia potencial. Aplicando o Teorema de Bernoulli, tem-se:

$$V_i^2 = V_n^2 - 2gh$$

em que h é a diferença de cotas entre o injetor e o ponto de impacto.

Para ambos os alvos do dispositivo *TecQuipment*, $h = 0,030$ m.

3.2.4. Procedimento experimental

Coloca-se o dispositivo para estudo do impacto de jactos (*TecQuipment*) descrito no parágrafo 2.3.4, no topo da bancada Cussons (Fig. 2.2), de forma a que fique alinhado com o canal de secção rectangular. Liga-se o tubo de abastecimento ao aparelho (Fig. 2.5), monta-se o injetor [3] com 10 mm de diâmetro e o alvo [2] com superfície plana ou semi-esférica côncava (Fig. 3.1). Seguidamente:

1. Em repouso (na ausência de jacto), o sistema deve estar em equilíbrio com a massa móvel apoiado sobre o braço, na origem da escala. Para o efeito, pode regular-se o “afinador” da mola até que as duas ranhuras do indicador de equilíbrio sejam ambas visíveis, uma acima e a outra abaixo da tampa.
2. Alinha-se o indicador de posição [1] com a marca da plataforma (Fig. 2.5).
3. Liga-se a bomba com a válvula fechada.
4. Desloca-se a massa para a extremidade (i.e. 140 mm para o alvo plano e 200 mm para o alvo côncavo). Abre-se a válvula reguladora de caudal [15] da bancada (Fig. 2.2) até que o sistema fique em equilíbrio (ambas as ranhuras do indicador de equilíbrio visíveis na posição de equilíbrio).
5. Mede-se o caudal com o rotâmetro [12] da bancada (Fig. 2.2). Anotam-se os valores do caudal e da posição da massa sobre a escala, na folha de resultados sugerida no parágrafo 3.2.6. Observa-se a forma do jacto deflectido.
6. Desloca-se a massa 20 mm para a esquerda (no sentido da diminuição do braço). Fecha-se ligeiramente a válvula, por forma a que se restabeleça de novo o equilíbrio e regista-se de novo o caudal e a posição da massa.
7. Repete-se esta operação seis vezes para o alvo plano ou oito vezes para alvo côncavo, diminuindo gradualmente o caudal.
8. Fecha-se a válvula de controle e desliga-se a bomba. Deixa-se o aparelho drenar a água existente no seu interior.

3.2.5. Cálculo da força exercida sobre o alvo

Na posição de equilíbrio inicial, o esquema de forças em jogo é o representado Fig. 3.3 em que G_b é o peso do braço metálico e do alvo, F_m a força exercida pela mola e $G_p = 5.88$ N (massa = 0,6 kg) o peso móvel. O equilíbrio de momentos em relação ao ponto de rotação do braço conduz às igualdades seguintes

$$F_m \cdot a_1 - G_p \cdot a_2 - G_b \cdot a_3 = 0$$

ou $G_p \cdot a_2 = F_m \cdot a_1 - G_b \cdot a_3$

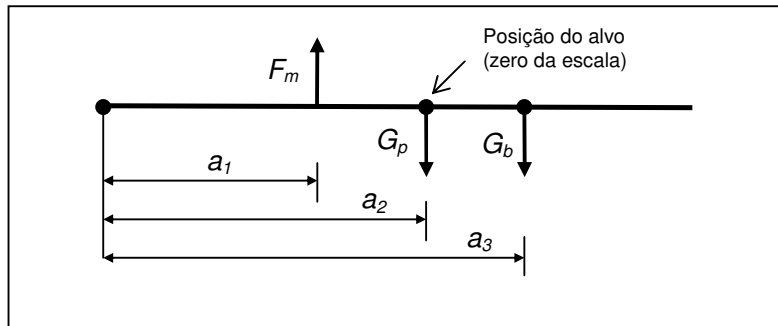


Fig. 3.3 – Esquema de forças na posição de equilíbrio inicial

Para qualquer outra posição de equilíbrio, é necessário considerar o impacto do jacto, de acordo com o esquema representado na Fig. 3.4. Do equilíbrio de momentos vem:

$$F_m \cdot a_1 - G_p (a_2 + a_4) + F \cdot a_2 - G_b \cdot a_3 = 0$$

Esta equação é, por sua vez, equivalente à seguinte:

$$G_p \cdot a_4 = F \cdot a_2$$

Tendo presente que $a_2 = 0,1565$ m e $G_p = 5.88$ N, a força F , em N, exercida pelo jacto sobre o alvo é dada por:

$$F = 37,57 a_4$$

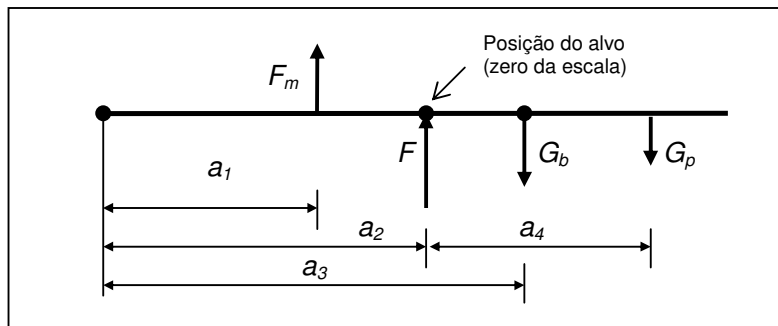


Fig. 3.4 – Esquema de forças para qualquer posição de equilíbrio

3.2.6. Apresentação e discussão de resultados

Tendo em vista facilitar a apresentação e discussão dos resultados, sugere-se o seguinte procedimento:

1. Anotam-se, para o alvo seleccionado, os valores do caudal e da posição do peso sobre a escala, no “Quadro de Resultados – Teorema de Euler e Impacto de Jactos”.
2. Calcula-se, para cada resultado, a velocidade do escoamento à saída do injector V_n . Corrige-se a velocidade de saída V_n em função da altura do alvo para obter a velocidade do impacto V_i .
3. Calcula-se a quantidade de movimento do jacto incidente, $\rho Q V_i$.
4. Faz-se o gráfico de variação da força de impacto, F (i.e. $F = 37,57 a_d$) em função da quantidade de movimento.
5. Por regressão, determina-se o declive da recta F vs. $\rho Q V_i$. Compara-se o declive obtido com o valores teórico 1,0 ou 2,0, consoante o alvo utilizado, e comentam-se os resultados.

“Quadro de Resultados – Teorema de Euler e Impacto de Jactos”

Série	1	2	3	4	5	6	7	8
Caudal, Q (l/h)								
Q (%)								
Posição do peso L (cm)								

3.3. Força de sustentação num perfil alar

3.3.1. *Objectivo*

O objectivo deste trabalho consiste na determinação, por via teórica e por via teórico-experimental, da força de sustentação aplicada a um perfil alar por acção de um escoamento potencial plano.

3.3.2. *Equipamento utilizado*

A realização deste trabalho requer a utilização da unidade de visualização de escoamentos descrita no parágrafo 2.4, sendo o perfil alar o obstáculo colocado no campo do escoamento. São fornecidos um cronómetro, um recipiente graduado, uma folha de acetato com o perfil alar previamente desenhado e uma régua graduada. Recorrendo à injeção de um líquido traçador, a bancada permite o desenho das linhas de corrente correspondentes ao campo de velocidades gerado pelo escoamento em torno do perfil alar.

3.3.3. *Requisitos teóricos*

Os alunos devem possuir noções básicas de Hidrocinemática e de escoamentos de fluidos perfeitos, nomeadamente a teoria dos escoamentos potenciais planos. Em particular, devem conhecer as condições de aplicação da equação de Bernoulli e serem fluentes na sua utilização em cálculos concretos de campos de pressões e velocidades.

O cálculo da força de sustentação por via teórica decorre da aplicação da teoria de escoamentos potenciais aplicada a perfis alares espessos (White 1999, p.528 e seguintes). De acordo com esta teoria, a força de sustentação por unidade de comprimento, F_L , aplicada a perfis alares espessos, define-se por

$$F_L = C_L L \gamma \frac{U_\infty^2}{2g}$$

em que γ é o peso volúmico do fluido, L é o comprimento da corda do perfil e U_∞ é a velocidade do escoamento na zona não perturbada do mesmo (Fig. 3.5).

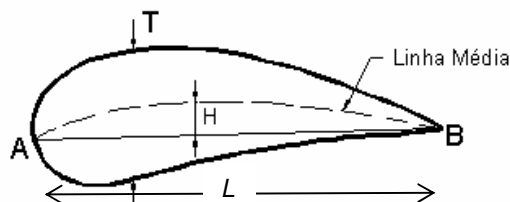


Fig. 3.5 – Geometria do perfil alar

O coeficiente de sustentação, C_L , é dado por:

$$C_L = 2\pi \left(1 + 0,77 \frac{T}{L} \right) \sin(\alpha + \theta)$$

em que $\theta = \arctan(2H/L)$ e H é o desvio máximo entre a linha média do perfil e a sua corda, T é a espessura do perfil e α é o ângulo de ataque (Fig. 3.6).

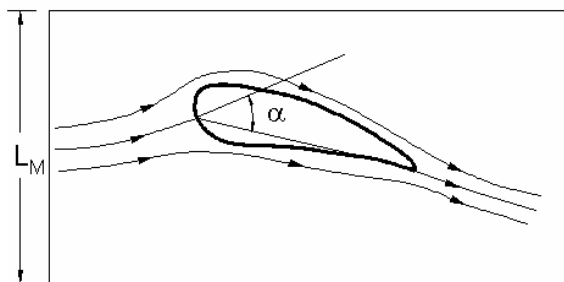


Fig. 3.6 – Padrão das linhas de corrente em torno do perfil alar

No caso presente, $L = 153 \text{ mm}$, $T = 28 \text{ mm}$, $H = 8 \text{ mm}$, $L_{ABextr.} = 162 \text{ mm}$, $L_{ABintr.} = 160 \text{ mm}$ e $L_{ABméd.} = 156 \text{ mm}$, em que $L_{ABextr.}$ é o comprimento do extradorso do perfil alar, $L_{ABintr.}$ o comprimento do correspondente intradorso e $L_{ABméd.}$ o comprimento da linha média.

3.3.4. Procedimento experimental

Para efectuar o trabalho, os alunos devem munir-se de caneta de acetato. Uma vez colocada a bancada em funcionamento e estabelecido o escoamento do fluido marcador de acordo com o procedimento descrito no parágrafo 2.4.2,

1. mede-se o nível da água, N_{∞} , no tubo ascendente [13], cf. Fig. 2.7, relativamente à base da unidade de visualização de escoamentos;
2. mede-se o caudal escoado, Q , pelo método volumétrico (para o efeito, cronometra-se o tempo de enchimento do recipiente graduado com um dado volume de água);
3. desenha-se, na folha de acetato, o padrão de linhas de corrente em torno do perfil alar, o que permite avaliar o ângulo α (Fig. 3.6).

“Quadro de Resultados – Força de Sustentação num Perfil Alar”

$N_{\infty} =$	m	$\alpha =$	$\ell l =$	m	$\ell E =$	m
$V_1 =$	m3	$\Delta t_1 =$	s	$Q_1 =$	ms ⁻¹	$Q =$ ms ⁻¹
$V_2 =$	m3	$\Delta t_2 =$	s	$Q_2 =$	ms ⁻¹	
$V_3 =$	m3	$\Delta t_3 =$	s	$Q_3 =$	ms ⁻¹	

3.3.5. Apresentação e discussão de resultados

Os alunos deverão apresentar os seguintes resultados:

- variação, ao longo da linha média do perfil, dos valores da pressão sobre o extradorso e o intradorso;
- valores do coeficiente de sustentação, C_L , e da força de sustentação por unidade de largura, F_L , obtidos pelas vias teórica e teórico-experimental.

Pretende-se, ainda, que os alunos elaborem um comentário crítico às eventuais discrepâncias encontradas. O comentário deve fundamentar-se na aplicabilidade das teorias utilizadas e na inevitabilidade dos erros experimentais.

Tendo em vista facilitar a apresentação dos cálculos decorrentes dos resultados experimentais, sugere-se a adopção do procedimento a seguir indicado e sistematizado no “Quadro de Cálculo”:

1. Calcula-se a velocidade, U_{∞} , na zona não perturbada do escoamento. Tem-se $U_{\infty} = Q/(BL_M)$, em que $B = 3$ mm é a espessura do campo do escoamento e $LM = 600$ mm é a sua largura em planta.
2. Divide-se o intradorso e o extradorso do perfil alar em 10 partes iguais;
3. Medem-se as larguras dos tubos de fluxo ao longo do intradorso, h_n^I , e do extradorso, h_n^E , do perfil alar.
4. Calculam-se as velocidades médias nas 20 “células” dos tubos de fluxo adjacentes ao perfil alar:

$$U_n^I = U_{\infty} \frac{\ell^I}{h_n^I}, \text{ no intradorso;}$$

$$U_n^E = U_{\infty} \frac{\ell^E}{h_n^E}, \text{ no extradorso.}$$

em que $\ell^I = \ell^E = 0,030$ m é a distância entre linhas de corrente na zona não perturbada do escoamento.

5. Calcula-se a energia mecânica por unidade de peso do fluido, E_∞ , do escoamento não perturbado pela equação

$$E_\infty = N_\infty - N_c$$

em que $N_c = 0,145$ m é a cota geométrica média do campo de escoamento, tal como N_∞ , medida em relação à base da unidade de visualização de escoamentos.

Aplica-se o teorema de Bernoulli para determinar as pressões nas 10 partes em que se subdivide o intradorso e o extradorso do perfil alar

$$p_n^I = \gamma \left(E_\infty - \frac{(U_n^I)^2}{2g} \right), \quad \text{no intradorso;}$$

$$p_n^E = \gamma \left(E_\infty - \frac{(U_n^E)^2}{2g} \right), \quad \text{no extradorso.}$$

7. Calculam-se as forças por unidade de comprimento (nas 10 partes em que se subdivide o intradorso e o extradorso do perfil)

$$F_n^I = p_n^I \frac{L_{ABintr.}}{10}, \quad \text{no intradorso;}$$

$$F_n^E = p_n^E \frac{L_{ABextr.}}{10}, \quad \text{no extradorso.}$$

8. Calcula-se a força de sustentação (por unidade de espessura) e respectiva linha de acção:

$$F_L = \sum_{10} F_n^I \sin(\beta_n^I) - \sum_{10} F_n^E \sin(\beta_n^E)$$

em que β_n^I é o ângulo que a força elementar F_n^I , perpendicular ao intradorso do perfil, faz com a horizontal e β_n^E é o ângulo correspondente para o extradorso.

Para efeitos de cálculo, resumem-se, a seguir, as principais características geométricas do campo do escoamento e do perfil:

$L_M = 0,60$ m	$B = 0,003$ m	$N_c = 0,145$ m
$L = 0,153$ m	$L_{ABextr.} = 0,162$ m	$L_{ABintr.} = 0,160$
$L_{ABméd.} = 0,156$ m	$T = 0,028$ m	$H = 0,008$ m

“Quadro de Cálculo – Força de Sustentação de um Perfil Alar”

$E_{\infty} = N_{\infty} - N_c =$	m	$U_{\infty} = Q/(BL_M) =$	ms ⁻¹
-----------------------------------	---	---------------------------	------------------

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h_n^I										
h_n^E										

U_n^I										
U_n^E										

p_n^I										
p_n^E										

F_n^I										
F_n^E										

β_n^I										
β_n^E										

$F_L = \sum_{10} F_n^I \text{sen}(\beta_n^I) - \sum_{10} F_n^E \text{sen}(\beta_n^E) =$	Nm-1	$C_L = F_L \left[L \gamma \frac{U_{\infty}^2}{2g} \right]^{-1} =$
---	------	--

3.4. Perdas de carga em alargamentos e em estreitamentos

3.4.1. Objectivo

O objectivo deste trabalho consiste na caracterização de perdas de carga em alargamentos e em estreitamentos bruscos e tronco-cónicos.

3.4.2. Equipamento utilizado

A realização deste trabalho implica a utilização da bancada Cussons (*cf.* parágrafo 2.3.2) equipada com o reservatório de entrada de carga constante, P6103, o reservatório de saída de carga variável, P6104, e o painel manométrico, P6106 (Fig. 3.7).

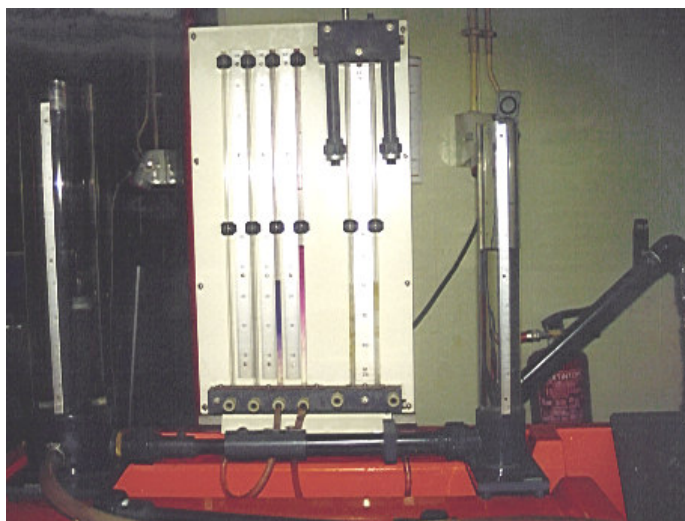


Fig. 3.7 – Visualização das perdas de carga (contínuas e localizadas)

Além dos referidos acessórios da bancada Cussons, utilizam-se os seguintes dispositivos experimentais da mesma bancada:

- (i) tubagem rectilínea P6221 com 10 mm de diâmetro (Fig. 3.8a);
- (ii) tubagem rectilínea P6222 com estreitamento/alargamento tronco-cónico (Fig. 3.8b);
- (iii) tubagem rectilínea P6222 com estreitamento/alargamento brusco (Fig. 3.8c).

O dispositivo P6222, para estudo de perdas de carga em mudanças de secção e na entrada e saída de tubos, compreende um conjunto de dois tubos tendo, cada um, o comprimento total de 464 mm. Cada tubo é constituído por dois trechos: um trecho com diâmetro interno de 10 mm e outro com o diâmetro interno de 20 mm. Um dos tubos tem uma transição gradual (Fig. 3.8b) entre os dois trechos e o outro tem uma transição brusca (Fig. 3.8c). A transição gradual é tronco-cónica com um ângulo de semi-abertura de 30° .

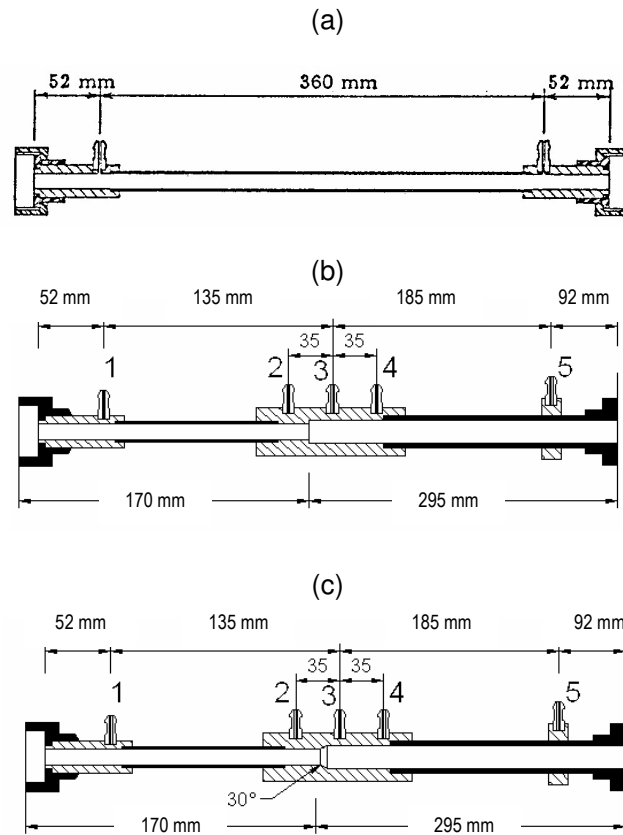


Fig. 3.8 – Dispositivos experimentais: (a) tubagem rectilínea com 10 mm de diâmetro P6221, (b) alargamento/estreitamento tronco-cónico ($\theta = 30^\circ$) P6222 e (c) alargamento/estreitamento brusco P6222.

3.4.3. Requisitos teóricos

A realização deste trabalho requer conhecimentos teóricos sobre perdas de carga contínuas em escoamentos turbulentos uniformes em tubos circulares comerciais e sobre perdas de carga singulares em alargamentos e estreitamentos. Recomenda-se o estudo dos parágrafos 7.7 e 9.3 de Quintela (1981).

3.4.4. Procedimento experimental

Antes de iniciar os ensaios, monta-se o painel manométrico da bancada, P6106, o reservatório de entrada de carga constante, P6103, e o reservatório de saída de carga variável, P6104. Entre os reservatórios, coloca-se a tubagem rectilínea com 10 mm de diâmetro, P6221. Liga-se o tubo de abastecimento ao reservatório de entrada. Seguidamente:

1. Liga-se a bomba da bancada por forma a estabelecer o escoamento através da tubagem rectilínea montada entre reservatórios. Eleva-se o tubo rotativo do reservatório de saída de modo a que fique quase na vertical. Ajusta-se a válvula de regulação de caudal (ou a velocidade da bomba) até criar um ligeiro escoamento na tubagem de segurança do reservatório de entrada de carga constante. Eliminam-se as bolhas de ar dos tubos manométricos e das tubagens flexíveis de ligação desses tubos às tomadas de pressão da tubagem. No reservatório de montante o nível situa-se a uma altura de 500 mm acima do eixo da conduta.
2. Obtêm-se dez condições de escoamento. Na primeira fixa-se o nível do reservatório de saída aproximadamente em 400 mm. Nas seguintes faz-se descer esse nível, sucessivamente, cerca de 25 mm de cada vez. Para cada condição mede-se, cuidadosamente, o caudal pelo método volumétrico descrito no parágrafo 2.3.5, considerando o volume de 5 litros no tanque de medição. Registam-se os resultados no “Quadro de Resultados – Perdas de Carga em Estreitamentos e Alargamentos” sugerido em parágrafo 3.4.5.
3. Interrompe-se o escoamento para drenagem do dispositivo e substituição da tubagem rectilínea pela tubagem com estreitamento tronco-cónico. Ligam-se as tomadas de pressão ao manómetro. Estabelece-se o escoamento e drena-se o ar do manómetro e das tubagens flexíveis de ligação.
4. Estabelecem-se cinco condições de escoamento. Na primeira, fixa-se o nível de água do reservatório de saída aproximadamente em 350 mm; para cada uma das seguintes, faz-se descer, sucessivamente, o nível cerca de 20 mm. Mede-se cuidadosamente o caudal pelo método referido para a tubagem rectilínea. Registam-se os resultados.
5. Repete-se o ponto 3, instalando a mesma tubagem mas invertida (alargamento tronco-cónico).
6. Repete-se o ponto 4.
7. Repete-se o ponto 3, instalando a tubagem com estreitamento brusco.
8. Repete-se o ponto 4, fixando inicialmente o nível do reservatório de saída em 350 mm e fazendo descer esse nível 20 mm para cada uma das condições de escoamento seguintes.
9. Repete-se o ponto 3 instalando a tubagem do ponto 7 mas invertida (alargamento brusco).
10. Repete-se o ponto 8.
11. Mede-se a temperatura da água.

3.4.5. Apresentação e discussão de resultados

Tendo em vista facilitar a apresentação e discussão dos resultados, sugere-se o seguinte:

A. Obtém-se a massa volúmica e a viscosidade da água em função da temperatura.

B. Relativamente às perdas de carga contínuas:

1. Calcula-se a velocidade média do escoamento para cada condição de ensaio.
2. Calcula-se o número de Reynolds.
3. Calcula-se a perda de carga total, $\Delta H_t = y_1 - y_2$. O significado de y_1 e de y_2 está definido no “Quadro de Resultados”.
4. Calcula-se a perda de carga unitária, sabendo que o comprimento da tubagem entre as tomadas de pressão de entrada e de saída é 360 mm.
5. Por regressão, obtém-se a equação $\log(J) = a_1 \log(U) + a_2$. Criticam-se os resultados com base, designadamente, na equação de Blasius.

C. Relativamente às perdas de carga nos estreitamentos e alargamentos:

1. Repetem-se os pontos 1 a 3 anteriores.
2. Calcula-se as perdas de carga unitárias para as tubagens de 10 mm e de 20 mm com base na equação obtida no ponto 5.
3. Calcula-se a perda de carga contínua sabendo que, entre as tomadas de pressão 1 e 5, os comprimentos totais das tubagens de 10 mm e de 20 mm são os que constam da Fig. 3.8. Calculam-se as alturas piezométricas das secções 2 e 4 e comparam-se os valores obtidos com as medições realizadas.
4. Calcula-se a perda de carga no estreitamento/alargamento subtraindo a perda de carga contínua calculada da perda de carga total medida.
5. Exprime-se a perda de carga no estreitamento/alargamento em termos do coeficiente K da expressão $\Delta H = K(U^2/2g)$ em que U é a velocidade média do escoamento e g a aceleração da gravidade.
6. Criticam-se os resultados com base na informação contida na literatura.

“Quadro de Resultados – Perdas de Carga em Estreitamentos e Alargamentos”

Perdas de Carga Contínuas (tubagem de 10 mm)

Série de ensaios	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Volume de água medido (l)										
Tempo de medição (s)										
Caudal, Q (l/s)										
Velocidade média, U (m/s)										
Número de Reynolds, Re										
Altura piezométrica à entrada, y_1 (m)										
Altura piezométrica à saída, y_2 (m)										
Perda de carga total, ΔH_t (m)										
Perda de carga unitária, J										

Perdas de Carga no Estreitamento Brusco/Tronco-cónico

Série de ensaios	1	2	3	4	5
Volume de água medido (l)					
Tempo de medição (s)					
Caudal, Q (l/s)					
Velocidade média na tubagem de 10 mm, U (m/s)					
Velocidade média na tubagem de 20 mm, U (m/s)					
Número de Reynolds na tubagem de 10 mm, Re					
Número de Reynolds na tubagem de 20 mm, Re					
Altura piezométrica na secção 1, y_1 (m)					
Altura piezométrica na secção 5, y_5 (m)					
Perda de carga total, ΔH_t (m)					
Perda de carga unitária na tubagem de 10 mm, J_{10mm}					
Perda de carga unitária na tubagem de 20 mm, J_{20mm}					
Perda de carga contínua, $\Delta H_{contínua}$ (m)					
Perda de carga no estreitamento, $\Delta H_{estreitamento}$ (m)					
Coeficiente de perda de carga, K					

Perdas de Carga no Alargamento Brusco/Tronco-cónico

Série de ensaios	1	2	3	4	5
Volume de água medido (l)					
Tempo de medição (s)					
Caudal, Q (l/s)					
Velocidade média na tubagem de 10 mm, U (m/s)					
Velocidade média na tubagem de 20 mm, U (m/s)					
Número de Reynolds na tubagem de 10 mm, Re					
Número de Reynolds na tubagem de 20 mm, Re					
Altura piezométrica na secção 1, y_1 (m)					
Altura piezométrica na secção 5, y_5 (m)					
Perda de carga total, ΔH_t (m)					
Perda de carga unitária na tubagem de 10 mm, J_{10mm}					
Perda de carga unitária na tubagem de 20 mm, J_{20mm}					
Perda de carga contínua, $\Delta H_{contínua}$ (m)					
Perda de carga no alargamento, $\Delta H_{alargamento}$ (m)					
Coeficiente de perda de carga, K					

3.5. Perdas de carga em curvas e em cotovelos

3.5.1. Objectivo

O objectivo deste trabalho consiste na caracterização de perdas de carga em curvas e em cotovelos.

3.5.2. Equipamento utilizado

A realização deste trabalho implica a utilização da bancada Cussons (cf. parágrafo 2.3.2) equipada com o reservatório de entrada de carga constante, P6103, o reservatório de saída de carga variável, P6104, e o painel manométrico, P6106. Além destes acessórios da bancada Cussons, utilizam-se os seguintes dispositivos experimentais da mesma bancada:

- (i) tubagem rectilínea, P6221 com 10 mm de diâmetro (Fig. 3.8a);
- (ii) tubagem rectilínea P6221 com quatro curvas (Fig. 3.9a);
- (iii) tubagem rectilínea P6221 com quatro cotovelos (Fig. 3.9b) .

O dispositivo P6221, para estudo de perdas de carga, compreende o conjunto de seis trechos de tubo. No presente ensaio apenas serão utilizados três dos trechos acima referidos e apresentados nas Fig. 3.8a e Fig. 3.9a,b.

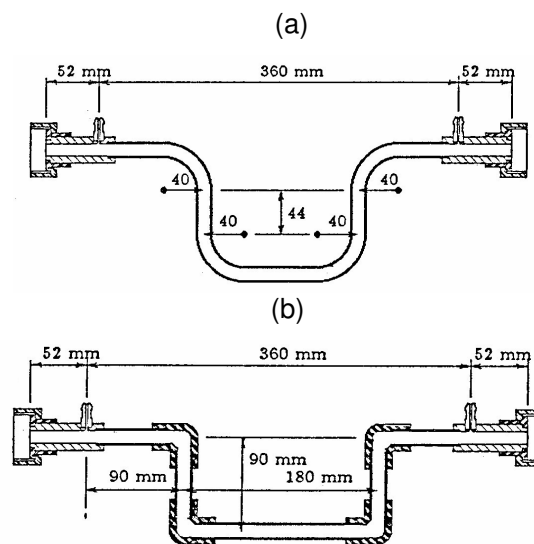


Fig. 3.9 – Tubagens P6221: (a) Trecho com quatro curvas e o diâmetro interno de 10 mm e (b) Trecho com quatro cotovelos com o diâmetro interno de 10 mm.

3.5.3. Requisitos teóricos

A realização deste trabalho requer conhecimentos teóricos sobre perdas de carga contínuas em escoamentos turbulentos uniformes em tubos circulares comerciais e sobre perdas de

carga singulares em alargamentos e estreitamentos. Recomenda-se o estudo dos parágrafos 7.7 e 9.3 de Quintela (1981).

3.5.4. *Procedimento experimental*

Antes de iniciar os ensaios, monta-se o painel manométrico da bancada, P6106, o reservatório de entrada de carga constante, P6103, e o reservatório de saída de carga variável, P6104. Entre os reservatórios, coloca-se a tubagem rectilínea com 10 mm, P6221. Liga-se o tubo de abastecimento ao reservatório de entrada. Seguidamente:

1. Liga-se a bomba da bancada por forma a estabelecer o escoamento através da tubagem rectilínea montada entre reservatórios. Eleva-se o tubo rotativo do reservatório de saída de modo a que fique quase na vertical. Ajusta-se a válvula de regulação de caudal (ou a velocidade da bomba) até criar um ligeiro escoamento na tubagem de segurança do reservatório de entrada de carga constante. Eliminam-se as bolhas de ar dos tubos manométricos e das tubagens flexíveis de ligação às tomadas de pressão da tubagem. No reservatório de montante o nível situa-se a uma altura de 500 mm acima do eixo da conduta.
2. Obtêm-se dez condições de escoamento. Na primeira fixa-se o nível do reservatório de saída aproximadamente em 400 mm. Nas seguintes faz-se descer esse nível, sucessivamente, cerca de 25 mm de cada vez. Para cada condição mede-se, cuidadosamente, o caudal pelo método volumétrico descrito no parágrafo 2.3.5, considerando o volume de 5 litros no tanque de medição. Registam-se os resultados no “Quadro de Resultados” sugerido em § 3.5.5.
3. Interrompe-se o escoamento para drenagem do dispositivo e substituição da tubagem rectilínea pela tubagem com quatro curvas. Ligam-se as tomadas de pressão ao manómetro. Estabelece-se o escoamento e drena-se o manómetro e tubagens flexíveis de ligação.
4. Estabelecem-se cinco condições de escoamento. Na primeira fixa-se o nível no reservatório de saída aproximadamente em 300 mm; para cada uma das seguintes faz-se descer, sucessivamente, o nível cerca de 40 mm. Mede-se cuidadosamente o caudal para a tubagem rectilínea. Registam-se os resultados.
5. Repete-se o ponto 3 do procedimento instalando a tubagem com cotovelos;
6. Repete-se o ponto 4, fixando inicialmente o nível do reservatório de saída em 300 mm e fazendo descer esse nível 40 mm para cada uma das condições de escoamento seguintes.
7. Mede-se a temperatura da água.

3.5.5. Apresentação e discussão de resultados

Tendo em vista facilitar a apresentação e discussão dos resultados, sugere-se o seguinte procedimento:

A. Obtém-se a massa volúmica e a viscosidade da água em função da temperatura.

B. Relativamente às perdas de carga contínuas:

1. Calcula-se a velocidade média do escoamento para cada condição de ensaio.
2. Calcula-se o número de Reynolds.
3. Calcula-se a perda de carga total, $\Delta H_t = y_1 - y_2$.
4. Calcula-se a perda de carga unitária, sabendo que o comprimento da tubagem entre as tomadas de pressão de entrada e saída é 360 mm.
5. Por regressão, obtém-se a equação $\log(J) = a_1 \log(U) + a_2$. Criticam-se os resultados com base, designadamente, na equação de Blasius.

C. Relativamente às perdas de carga nas curvas:

1. Repetem-se os pontos 1 a 3 anteriores.
2. Calcula-se a perda de carga unitária com base na equação referida no ponto 5.
3. Calcula-se a perda de carga contínua sabendo que o comprimento da tubagem entre tomadas de pressão é 540 mm.
4. Calcula-se a perda de carga de cada curva subtraindo a perda de carga contínua calculada da perda de carga total medida e dividindo por quatro.
5. Exprime-se a perda de carga por curva em termos do coeficiente K da equação $\Delta H = K(U^2/2g)$, onde U é a velocidade média e g a aceleração da gravidade.
6. Criticam-se os resultados com base em informação contida na literatura.

D. Relativamente às perdas de carga nos cotovelos:

Repete-se o procedimento referido para as curvas tendo presente que o comprimento da tubagem entre tomadas de pressão é também 540 mm.

“Quadro de Resultados – Perdas de Carga Singularidades”

Perdas de Carga Contínuas

Série de ensaios	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Volume de água medido (l)										
Tempo de medição (s)										
Caudal, Q (l/s)										
Velocidade média, U (m/s)										
Número de Reynolds, Re										
Altura piezométrica à entrada, y_1 (m)										
Altura piezométrica à saída, y_5 (m)										
Perda de carga total, ΔH_t (m)										
Perda de carga unitária, J										

Perdas de Carga nas Curvas

Série de ensaios	1	2	3	4	5
Volume de água medido (l)					
Tempo de medição (s)					
Caudal, Q (l/s)					
Velocidade média, U (m/s)					
Número de Reynolds, Re					
Altura piezométrica à entrada, y_1 (m)					
Altura piezométrica à saída, y_2 (m)					
Perda de carga total, ΔH_t (m)					
Perda de carga unitária, J					
Perda de carga contínua, $\Delta H_{contínua}$ (m)					
Perda de carga por curva, ΔH_{curva}					
Coeficiente de perda de carga, K					

Perdas de Carga nos Cotovelos

Série de ensaios	1	2	3	4	5
Volume de água medido (l)					
Tempo de medição (s)					
Caudal, Q (l/s)					
Velocidade média, U (m/s)					
Número de Reynolds, Re					
Altura piezométrica à entrada, y_1 (m)					
Altura piezométrica à saída, y_2 (m)					
Perda de carga total, ΔH_t (m)					
Perda de carga unitária, J					
Perda de carga contínua, $\Delta H_{contínua}$ (m)					
Perda de carga por curva, ΔH_{curva}					
Coeficiente de perda de carga, K					

3.6. Perdas de carga em válvulas

3.6.1. Objectivo

O objectivo deste trabalho consiste na caracterização de perdas de carga em válvulas, nomeadamente numa válvula esférica e numa válvula sede cilíndrica inclinada.

3.6.2. Equipamento utilizado

A realização deste trabalho implica a utilização da bancada Cussons (*cf.* parágrafo 2.3.2) equipada com o reservatório de entrada de carga constante, P6103, o reservatório de saída de carga variável, P6104, e o painel manométrico, P6106. Além destes acessórios da bancada Cussons, utilizam-se os seguintes dispositivos experimentais da mesma bancada:

- (i) tubagem rectilínea, P6221 com 10 mm de diâmetro (Fig. 3.8a);
- (ii) tubagem rectilínea P6221 com uma válvula esférica (Fig. 3.10a);
- (iii) tubagem rectilínea P6221 com uma válvula sede cilíndrica inclinada (Fig. 3.10b).

O dispositivo P6221, para estudo de perdas de carga, compreende o conjunto de seis trechos de tubo. No presente ensaio apenas serão utilizados três dos trechos acima referidos e apresentados nas Fig. 3.8a e Fig. 3.10a,b.

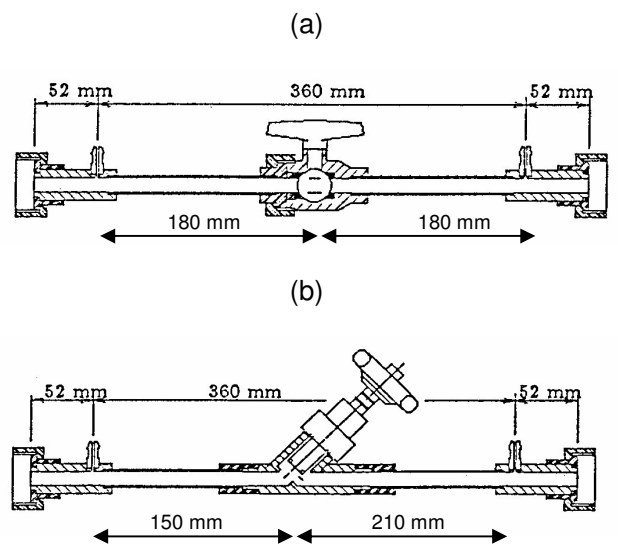


Fig. 3.10 – Tubagens P6221: (a) trecho recto com uma válvula esférica e (b) trecho recto com uma válvula de sede cilíndrica inclinada .

3.6.3. Requisitos teóricos

A realização deste trabalho requer conhecimentos teóricos sobre perdas de carga contínuas em escoamentos turbulentos uniformes em tubos circulares comerciais e sobre perdas de

carga singulares em alargamentos e estreitamentos. Recomenda-se o estudo dos parágrafos 7.7 e 9.3 de Quintela (1981).

3.6.4. *Procedimento experimental*

Antes de iniciar os ensaios, monta-se o painel manométrico da bancada, P6106, o reservatório de entrada de carga constante, P6103, e o reservatório de saída de carga variável, P6104. Entre os reservatórios, coloca-se a tubagem rectilínea com 10 mm de diâmetro, P6221. Liga-se o tubo de abastecimento ao reservatório de entrada. Seguidamente:

1. Liga-se a bomba da bancada por forma a estabelecer o escoamento através da tubagem rectilínea montada entre reservatórios. Eleva-se o tubo rotativo do reservatório de saída de modo a que fique quase na vertical. Ajusta-se a válvula de regulação de caudal (ou a velocidade da bomba) até criar um ligeiro escoamento na tubagem de segurança do reservatório de entrada de carga constante. Eliminam-se as bolhas de ar dos tubos manométricos e das tubagens flexíveis de ligação desses tubos às tomadas de pressão da tubagem. No reservatório de montante o nível situa-se a uma altura de 500 mm acima do eixo da conduta.
2. Obtêm-se dez condições de escoamento. Na primeira, fixa-se o nível do reservatório de saída aproximadamente em 400 mm. Nas seguintes, faz-se descer esse nível, sucessivamente, cerca de 25 mm de cada vez. Para cada condição mede-se, cuidadosamente, o caudal pelo método volumétrico descrito no parágrafo 2.3.5, considerando o volume de 5 litros no tanque de medição. Registam-se os resultados no “Quadro de Resultados” sugerido no parágrafo 3.6.5.
3. Interrompe-se o escoamento para drenagem do dispositivo e substituição da tubagem rectilínea pela tubagem rectilínea P6221 com uma válvula esférica. Ligam-se as tomadas de pressão ao manómetro. Estabelece-se o escoamento e drena-se o manómetro e tubagens flexíveis de ligação.
4. Realizam-se 3 séries de medições relativamente aos níveis no reservatório de jusante de 400 mm, 300 mm e 200 mm respectivamente. Cada série de medições é efectuada para três posições distintas de abertura da válvula:
 - válvula totalmente aberta ou coincidente com o traço branco grosso mais afastado do manípulo (posição P_1);
 - fecha-se a válvula até ao traço fino seguinte (posição P_2);
 - fecha-se ainda mais a válvula até ao último traço branco (situado mais perto do manípulo) (posição P_3).

Relativamente à válvula de sede cilíndrica inclinada a total de abertura ou posição P_1 está a 16 mm da posição totalmente fechada, a posição P_2 está a 8 mm, e a posição P_3 a 5 mm, respectivamente.

5. Após estabelecido um regime de escoamento permanente e para cada posição de abertura da válvula referida (P_1 , P_2 e P_3), medem-se cuidadosamente os níveis piezométricos a montante e a jusante da válvula com base nas réguas graduadas existentes e o caudal utilizando o tanque volumétrico e um cronómetro. Registam-se os resultados.
6. Repete-se o ponto 3 do procedimento instalando a tubagem P6221 com uma válvula de sede cilíndrica inclinada
7. Repete-se o ponto 4, fixando inicialmente o nível do reservatório de saída para cada uma das condições de escoamento.
8. Mede-se a temperatura da água.

3.6.5. *Apresentação e discussão de resultados*

Tendo em vista facilitar a apresentação e discussão dos resultados, sugere-se o seguinte procedimento:

A. Obtém-se a massa volúmica e a viscosidade da água em função da temperatura.

B. Relativamente às perdas de carga contínuas:

1. Calcula-se a velocidade média do escoamento para cada condição de ensaio.
2. Calcula-se o número de Reynolds.
3. Calcula-se a perda de carga total, $\Delta H_t = y_1 - y_2$.
4. Calcula-se a perda de carga unitária, sabendo que o comprimento da tubagem entre as tomadas de pressão de entrada e saída é 360 mm.
5. Por regressão, obtém-se a equação $\log(J) = a_1 \log(U) + a_2$. Criticam-se os resultados com base, designadamente, na equação de Blasius.

C. Relativamente às perdas de carga nas válvulas:

1. Repetem-se os pontos 1 a 3 anteriores.
2. Calcula-se a perda de carga unitária com base na equação referida no ponto 5.
3. Calcula-se a perda de carga contínua sabendo que o comprimento da tubagem entre tomadas de pressão 360 mm
4. Calcula-se a perda de carga para cada posição P_i da válvula subtraindo a perda de carga contínua calculada da perda de carga total medida.

5. Exprime-se a perda de carga localizada para cada posição P_i da válvula em termos do coeficiente K_v da equação $\Delta H = K_v(U^2/2g)$, sendo U é a velocidade média do escoamento e g a aceleração da gravidade.
6. Traçam-se os gráficos da variação de K_v com o grau de abertura da válvula para cada série de ensaios.
7. Criticam-se os resultados com base em informação contida na literatura.

“Quadro de Resultados – Perdas de Carga em Válvulas”

Perdas de Carga Contínuas

	Série									
	Temperatura da água = °C									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Volume de água medido (l)										
Tempo de medição (s)										
Caudal, Q (l/s)										
Velocidade média, U (m/s)										
Número de Reynolds, Re										
Altura piezométrica à entrada, y_1 (m)										
Altura piezométrica à saída, y_2 (m)										
Perda de carga total, ΔH_t (m)										
Perda de carga unitária, J										

$$\text{Log}(J) = \text{Log}(U) + \text{Log}(K_v)$$

Perdas de Carga Localizadas na Válvula

	Série								
	P_1			P_2			P_3		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Volume de água recolhida (m^3)									
Tempo para recolha da água, t (s)									
Caudal Q (m^3/s)									
Velocidade média U (m/s)									
Nº de Reynolds, Re									
Altura cinética $\propto V^2/2g$ (m)									
Altura piezométrica à entrada, y_1 (m)									
Altura piezométrica à saída, y_2 (m)									
Perda de carga total (m)									
Perda de carga na válvula ΔH_v (m)									
Perda de carga unitária, J									
Coefficiente K_v									
Abertura da válvula (mm)									
% da abertura da válvula									

3.7. Curvas de regolfo provocadas por comporta plana com abertura inferior

3.7.1. Objectivo

O objectivo do trabalho consiste no estudo das condições do escoamento provocado por uma comporta plana vertical com abertura inferior, a jusante da qual ocorre um ressalto hidráulico. Pretende-se, essencialmente, verificar as hipóteses de conservação da energia específica junto à comporta e da conservação da quantidade de movimento total no ressalto. O trabalho tem ainda por objectivo medir o comprimento do ressalto e avaliar a respectiva perda de carga.

3.7.2. Equipamento utilizado

A realização deste trabalho implica a utilização do canal de inclinação variável descrito no parágrafo 2.5. Na respectiva secção final está instalada uma das comportas do canal e, numa secção intermédia, está instalada a outra comporta. As medições da altura do escoamento são efectuadas por recurso a um hidrómetro de ponta direita que equipa o canal.

3.7.3. Requisitos teóricos

Para que o trabalho permita consolidar os conhecimentos envolvidos, os alunos devem, *a priori*, saber aplicar a escoamentos com superfície livre os princípios da conservação da energia e da quantidade de movimento. Devem ainda saber calcular a perda de carga no ressalto hidráulico em canais rectangulares horizontais e o respectivo comprimento aproximado. Sugere-se o estudo de Manzanares (1980), Cap. 4.

3.7.4. Procedimento experimental

Antes de se iniciarem as medições, o responsável pela condução dos ensaios deve fixar a abertura da válvula de cunha do circuito de alimentação do canal, a inclinação do canal e a abertura das comportas. Estas variáveis devem permanecer inalteradas no decurso do ensaio.

O andamento qualitativo da superfície livre do escoamento é o que se representa na Fig. 3.11, onde se indicam esquematicamente as secções de medição das alturas do escoamento, numeradas de 1 a 4.

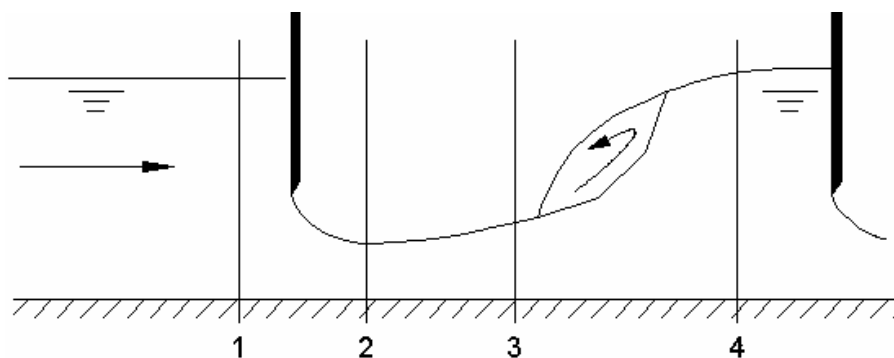


Fig. 3.11 – Andamento qualitativo da superfície livre do escoamento

Aos alunos compete medir as alturas da água a montante e a jusante da primeira comporta e do ressalto hidráulico, em secções a indicar pelo responsável, registrar a posição das secções de medição, medir o comprimento aproximado do ressalto e a altura do escoamento em relação à crista do descarregador ("Quadro de Resultados – Comporta").

"Quadro de Resultados – Comporta"

Caudal (ℓs^{-1})	Declive (%)	Abertura das comportas (m)	
		De montante	De jusante

Distância das secções de medição à entrada do canal			
Secção 1	Secção 2	Secção 3	Secção 4

Níveis (medidos com o hidrómetro, em mm)							
Secção 1		Secção 2		Secção 3		Secção 4	
Fundo	Sup. livre	Fundo	Sup. livre	Fundo	Sup. livre	Fundo	Sup. livre

Comprimento do ressalto (cm)	±

3.7.5. Apresentação e discussão de resultados

Serão comparados os valores da energia específica, da quantidade de movimento, da perda de carga e do comprimento do ressalto, calculados com base em medidas de alturas do

escoamento, do caudal escoado, da abertura da comporta e do declive do canal, com os valores calculados por via teórica, procurando explicar eventuais desvios.

Tendo em vista facilitar a apresentação dos resultados, sugere-se a adopção do seguinte procedimento:

1. indica-se o caudal escoado;
2. classificam-se as curvas de regolho observadas;
3. apresentam-se, na forma de tabela, os valores de h_1 , h_2 , h_3 , h_4 , H_1 , H_2 , H_3 , H_4 , M_1 , M_2 , M_3 , M_4 , ΔH e L , em que h designa altura de água, H energia específica, M quantidade de movimento total ou impulsão total, ΔH perda de carga no ressalto e L comprimento do mesmo;
4. calcula-se o valor teórico de h_2 partindo do valor medido de h_1 ;
5. calcula-se o coeficiente de contracção da comporta;
6. calcula-se a impulsão na comporta;
7. calculam-se os valores teóricos de h_4 , H_4 , ΔH e L com base na medição de h_3 .

Por último, os alunos devem procurar explicar as diferenças entre previsões e observações.

3.8. Curvas de regolho provocadas por uma soleira sobrelevada

3.8.1. Objectivo

O objectivo do trabalho consiste no estudo das condições do escoamento provocadas por uma alteração do perfil do fundo de um canal, em consequência da presença de uma soleira sobrelevada, a jusante da qual ocorre um ressalto hidráulico. Pretende-se, essencialmente, verificar as hipóteses de conservação da energia do escoamento sobre a soleira e da conservação da quantidade de movimento total no ressalto. O trabalho tem ainda por objectivo avaliar a força de arrastamento a que está sujeita a soleira, medir o comprimento do ressalto e avaliar a respectiva perda de carga.

3.8.2. Equipamento utilizado

A realização deste trabalho implica a utilização do canal de inclinação variável descrito no parágrafo 2.5. Na respectiva secção final está instalada uma das comportas do canal e, numa secção intermédia, em posição a definir pelo docente responsável, está uma soleira trapezoidal com 72,5 mm de altura. As medições da altura do escoamento são efectuadas por recurso a um hidrómetro de ponta direita que equipa o canal.

3.8.3. Requisitos teóricos

Para que o trabalho permita consolidar os conhecimentos envolvidos, os alunos devem, *à priori*, saber aplicar os princípios da conservação da energia e da quantidade de movimento aos escoamentos com superfície livre. Devem ainda saber calcular a perda de carga no ressalto hidráulico em canais rectangulares horizontais e o respectivo comprimento aproximado. Sugere-se o estudo de Manzanares (1980), Cap. 4.

3.8.4. Procedimento experimental

Antes de se iniciarem as medições, o responsável pela condução dos ensaios deve fixar a abertura da válvula de cunha do circuito de alimentação canal, a inclinação do canal e a abertura da comporta de jusante. Estas variáveis devem permanecer inalteradas no decurso do ensaio.

O andamento qualitativo da superfície livre do escoamento é o que se apresenta na Fig. 3.12, onde se indicam esquematicamente as secções de medição das alturas do escoamento numeradas de 1 a 5.

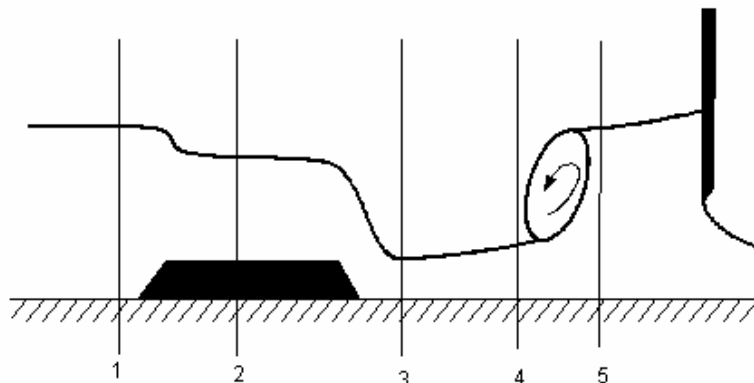


Fig. 3.12 – Andamento qualitativo da superfície livre do escoamento

Aos alunos compete medir as alturas da água a montante, sobre e a jusante da soleira, a montante e jusante do ressalto hidráulico, em secções a indicar pelo responsável, registar a posição das secções de medição, medir o comprimento aproximado do ressalto e a altura do escoamento em relação à crista do descarregador Bazin (ver "Quadro de Resultados – soleira").

Quadro de Resultados – Soleira

Caudal (ℓs^{-1})	Declive (%)	Abertura da comporta de jusante(m)

Distância das secções de medição à entrada do canal				
Secção 1	Secção 2	Secção 3	Secção 4	Secção 5

Níveis (medidos com o hidrómetro, em mm)									
Secção 1		Secção 2		Secção 3		Secção 4		Secção 5	
Fundo	Sup.	Fundo	Sup.	Fundo	Sup.	Fundo	Sup.	Fundo	Sup.

Comprimento do ressalto (cm)	±
------------------------------	---

3.8.5. Apresentação e discussão de resultados

Serão comparados os valores da energia específica, da quantidade de movimento, da perda de carga e do comprimento do ressalto, calculados com base em medidas de alturas do escoamento, do caudal escoado, da altura da soleira e do declive do canal, com os valores calculados por via teórica, procurando explicar eventuais desvios.

Tendo em vista facilitar a apresentação dos resultados, sugere-se a adopção do seguinte procedimento:

1. indica-se o caudal escoado;
2. classificam-se as curvas de regolho observadas;
3. apresentam-se, na forma de tabela, os valores de h_1 , h_2 , h_3 , h_4 , h_5 , H_1 , H_2 , H_3 , H_4 , H_5 , M_1 , M_2 , M_3 , M_4 , M_5 , ΔH e L , em que h designa altura de água, H energia específica, M quantidade de movimento total ou impulsão total, ΔH perda de carga no ressalto e L comprimento do ressalto;
4. calculam-se os valores teóricos de h_2 , h_3 e H_2 , partindo do valor medido de h_1 ;
5. calcula-se a força de arrastamento que actua na soleira;
6. calculam-se os valores teóricos de h_5 , ΔH e L com base na medição de h_4 .

Por último, os alunos devem procurar explicar as diferenças entre previsões e observações.

3.9. Curvas de regolfo provocadas por um estreitamento

3.9.1. Objectivo

O objectivo do trabalho consiste no estudo das condições do escoamento provocadas por uma alteração da secção transversal de um canal, em consequência da presença de um estreitamento, a jusante do qual ocorre um ressalto hidráulico. Pretende-se, essencialmente, verificar as hipóteses de conservação da energia do escoamento no estreitamento e da conservação da quantidade de movimento total no ressalto. O trabalho tem ainda por objectivo avaliar a força de arrastamento a que está sujeito o estreitamento, medir o comprimento do ressalto e avaliar a respectiva perda de carga.

3.9.2. Equipamento utilizado

A realização deste trabalho implica a utilização do canal de inclinação variável descrito no parágrafo 2.5. Na respectiva secção final está instalada uma das comportas do canal e, numa secção intermédia, em posição a definir pelo docente responsável, está o estreitamento com as características definidas na Fig. 3.13. As medições da altura do escoamento são efectuadas por recurso a um hidrómetro de ponta direita que equipa o canal.

3.9.3. Requisitos teóricos

Para que o trabalho permita consolidar os conhecimentos envolvidos, os alunos devem, *à priori*, saber aplicar os princípios da conservação da energia e da quantidade de movimento aos escoamentos com superfície livre. Devem ainda saber calcular a perda de carga no ressalto hidráulico em canais rectangulares horizontais e o respectivo comprimento aproximado. Sugere-se o estudo de Manzanares (1980), Cap. 4.

3.9.4. Procedimento experimental

Antes de se iniciarem as medições, o responsável pela condução dos ensaios procede ao ajustamento da abertura da válvula de cunha, a inclinação do canal e a abertura das comportas para as condições a analisar. Estas variáveis devem permanecer inalteradas no decurso do ensaio.

O andamento qualitativo da superfície livre do escoamento é o que se apresenta na Fig. 3.13, onde se indicam esquematicamente as secções de medição das alturas do escoamento, numeradas de 1 a 5.

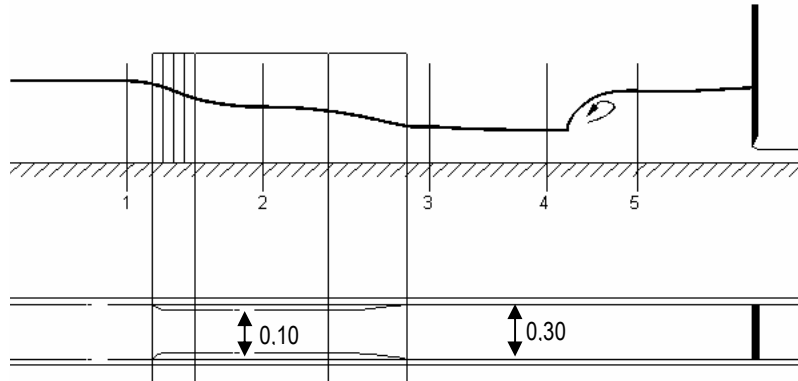


Fig. 3.13 – Andamento qualitativo da superfície livre do escoamento

Aos alunos compete medir as alturas da água montante, sensivelmente a meio e a jusante do estreitamento, a montante e a jusante do ressalto hidráulico, em secções a indicar pelo responsável, registar a posição das secções de medição, medir o comprimento aproximado do ressalto e a altura do escoamento em relação à crista do descarregador Bazin (ver "Quadro de Resultados – Estreitamento").

“Quadro de Resultados – Estreitamento”

Caudal (ℓs^{-1})	Declive (%)	Abertura da comporta de jusante(m)

Distância das secções de medição à entrada do canal				
Secção 1	Secção 2	Secção 3	Secção 4	Secção 5

Níveis (medidos com o hidrómetro, em mm)									
Secção 1		Secção 2		Secção 3		Secção 4		Secção 5	
Fundo	Sup.	Fundo	Sup.	Fundo	Sup.	Fundo	Sup.	Fundo	Sup.

Comprimento do ressalto (cm)	±

3.9.5. Apresentação e discussão de resultados

Serão comparados os valores da energia específica, da quantidade de movimento, da perda de carga e do comprimento do ressalto, calculados com base em medidas de alturas do escoamento, do caudal escoado, do estreitamento e do declive do canal, com os valores calculados por via teórica, procurando explicar eventuais desvios.

Tendo em vista facilitar a apresentação dos resultados, sugere-se a adopção do seguinte procedimento:

1. indica-se o caudal escoado e classificar as curvas de regolho observadas;
2. apresentam-se, na forma de tabela, os valores de h_1 , h_2 , h_3 , h_4 , h_5 , H_1 , H_2 , H_3 , H_4 , H_5 , M_1 , M_2 , M_3 , M_4 , M_5 , ΔH e L , em que h designa altura de água, H energia específica, M quantidade de movimento total ou impulsão total, ΔH perda de carga no ressalto e L comprimento do ressalto;
3. calcula-se o valor teórico de h_1 partindo do valor medido de h_2 ;
4. calcula-se a força de arrastamento que actua no estreitamento;
5. calculam-se os valores teóricos de h_5 , H_5 , ΔH e L com base na medição de h_4 .

Por último, os alunos devem procurar explicar as diferenças entre previsões e observações.

3.10. Curvas de vazão de descarregadores de parede delgada

3.10.1. Objectivo

O objectivo deste trabalho consiste no estabelecimento das curvas de vazão de um descarregador rectangular com contracção lateral e de dois descarregadores triangulares (60° e 90°), cf. Fig. 2.4.

3.10.2. Equipamento utilizado

Neste trabalho utilizam-se os descarregadores de parede delgada descritos no parágrafo 2.3.4, montados na Bancada Cussons, e um hidrómetro de ponta direita.

3.10.3. Requisitos teóricos

O caudal escoado sobre um descarregador sem contracção lateral é dado pela lei de vazão

$$Q = Cb\sqrt{2gh}^{3/2}$$

em que C é o coeficiente de vazão, h a diferença de cotas entre a crista do descarregador e a superfície livre na secção de medição e b a largura do descarregador. O coeficiente de vazão poderá considerar-se aproximadamente igual a 0,40.

Num descarregador rectangular cuja largura, b , seja inferior à largura, B , do canal onde está instalado, ocorre contracção lateral da veia líquida. De entre as várias soluções propostas para o cálculo do caudal nesta situação conta-se a de Francis. Este autor considera o valor de $C = 0,40$ ($\approx$ coeficiente de vazão de um descarregador Bazin) e o valor da contracção num lado igual a $0,10h$, de que resulta uma largura efectiva, b' , definida por

$$b' = b - 0,1N h$$

em que N representa o número de contracções (N igual a 1 ou a 2). Para dupla contracção,

$$b' = b - 0,2 h.$$

Esta largura b' substitui b na lei de vazão. A solução de Francis proporciona bons resultados desde que $B - b \geq 6 h$.

O caudal num descarregador triangular é dada por

$$Q = C \frac{8}{15} \sqrt{2g} \left(\frac{\theta}{2} \right) h^{5/2}$$

em que θ é o ângulo de abertura do descarregador e h a carga. Na prática, é frequente recorrer-se à fórmula de Gourley e Grimp

$$Q = 1,32 \operatorname{tg} \left(\frac{\theta}{2} \right) h^{2,47}$$

válida em unidades do SI.

3.10.4. Procedimento experimental

O procedimento experimental é o seguinte:

1. Coloca-se o hidrómetro de ponta direita nas respectivas fixações no tampo da bancada;
2. Liga-se o tubo flexível de alimentação situado sobre o tampo ao dispositivo de tranquilização (que consiste num cubo de rede preenchido com esferas de vidro) e coloca-se este dispositivo na extremidade de montante do canal moldado no topo da bancada Cussons;
3. Fixa-se o descarregador no extremo de jusante do canal, assegurando que a respectiva aresta fica do lado de montante;
4. Liga-se a bomba, mantendo fechada a válvula de controlo de caudal [15];

5. Estabelece-se o escoamento sobre o descarregador instalado, ajustando a válvula [15] para a situação de máxima abertura e para a máxima velocidade de rotação da bomba;
6. Diminui-se o caudal escoado, fechando gradualmente a válvula de controle de caudais, de modo a conseguir, aproximadamente, variações de carga de 3 mm ($\Delta h \approx 0,3$ cm);
7. Repete-se o procedimento do ponto f) para 10 situações diferentes de (h, Q) .

3.10.5. Apresentação e discussão de resultados

Tendo em vista facilitar a apresentação e discussão dos resultados, sugere-se o seguinte procedimento:

A. No caso dos descarregadores triangulares:

1. Anotam-se os valores de cargas e caudais no “Quadro de Resultados – Descarregador Triangular”. Regista-se a forma da veia líquida descarregada.

Quadro de Resultados – Descarregador Triangular

DESCARREGADOR:										
Carga (m)										
Caudal (m ³ /s)										
$\log(Q)$										
$\log(h)$										

2. Traça-se o gráfico de $\log(Q)$ em função de $\log(h)$ e estima-se a respectiva recta de regressão. Calcula-se a ordenada na origem e o declive. A partir destes valores, determina-se o coeficiente de vazão e o expoente da lei de vazão.
3. Comparam-se os valores obtidos com os propostos por Gourley e Grimp e discutem-se as diferenças.

B. No caso do descarregador rectangular:

1. Anotam-se os valores de cargas e caudais no “Quadro de Resultados – Descarregador Rectangular”. Regista-se a forma da veia líquida descarregada.

Quadro de Resultados – Descarregador Rectangular

DESCARREGADOR:									
Carga (m)									
Caudal (m ³ /s)									
C									

2. Calcula-se b' pela fórmula de Francis e, por inversão da lei de vazão, o valor do coeficiente C . Regista-se o valor calculado, para cada par de valores de h e Q , no “Quadro de resultados”.
3. Traça-se o gráfico de C em função de h e comparam-se os valores obtidos com o valor proposto por Francis.

3.11. Poço atravessando um manto freático sobre camada impermeável horizontal

3.11.1. Objectivo

O objectivo deste trabalho consiste na determinação da curva de depressão resultante do funcionamento de um poço que atravessa um manto freático sobre camada impermeável horizontal.

3.11.2. Equipamento utilizado

Neste trabalho utiliza-se a unidade de escoamentos em meios porosos descrita no parágrafo 2.6, um cronómetro e um recipiente graduado.

3.11.3. Requisitos teóricos

Para que o trabalho permita consolidar os conhecimentos envolvidos, os alunos devem, *a priori*, saber aplicar a lei de Darcy ao caso de um poço que atravessa um manto freático sobre uma camada impermeável horizontal. Recomenda-se o estudo do Capítulo 13 de Quintela 1981.

3.11.4. Procedimento experimental

Antes de se iniciarem as medições, o responsável pela condução dos ensaios fixa a altura da areia no tanque em 150 mm. Além disso, estabelece a ligação das tubagens flexíveis de

abastecimento dos difusores de entrada [9], cf. Fig. 2.11, à rede geral de abastecimento e a ligação do furo do poço esquerdo [6] à drenagem do laboratório. Seguidamente, como procedimento experimental,

1. Abrem-se as válvulas de controlo do escoamento [5] e do furo do poço esquerdo.
2. Ajusta-se a abertura das válvulas [5] até se atingirem alturas piezométricas estáveis nos tubos manométricos.
3. Registam-se os níveis nos dezanove tubos manométricos no “Quadro de resultados”.
4. Coloca-se a extremidade o tubo flexível de drenagem do poço esquerdo no recipiente graduado e regista-se no “Quadro de Resultados – Meios Porosos” o tempo que demora a perfazer um dado volume de água nesse recipiente.
5. Repete-se o procedimento a partir do ponto 3 depois de ajustar de forma diferente as válvulas de controlo do escoamento [5].
6. Desliga-se o abastecimento de água e termina-se o ensaio.

3.11.5. *Apresentação e discussão de resultados*

Tendo em vista facilitar a apresentação e discussão dos resultados, sugere-se o seguinte procedimento:

1. Traça-se o gráfico da altura piezométrica, h , em função da distância medida a partir do eixo do poço, utilizando as leituras dos tubos manométricos 1 a 3 e 10 a 19 (cf. Fig. 2.12). Colocam-se no mesmo gráfico os resultados obtidos nos tubos manométricos 4 a 9, ficando assim definida a configuração tridimensional do cone de depressão.
2. Sabendo o valor do caudal medido e das alturas piezométricas em dois tubos manométricos considerados os mais apropriados, determina-se a permeabilidade, K , através da lei de Darcy.
3. Analisam-se os resultados obtidos por comparação com a solução analítica pertinente, comentando a influência da permeabilidade na configuração do cone de depressão.

“Quadro de Resultados – Meios Porosos”

1º ensaio

Tubo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h (mm)										
Tubo	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
h (mm)										
Tempo (s)										
Volume (ℓ)										

2º ensaio

Tubo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h (mm)										
Tubo	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
h (mm)										
Tempo (s)										
Volume (ℓ)										

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Manzanares, A. A. (1980). *Hidráulica Geral II*, Técnica, AEIST, Lisboa.

Quintela, A. C. (1981). *Hidráulica*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.

White, F. M. (1999). *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill, Singapore.